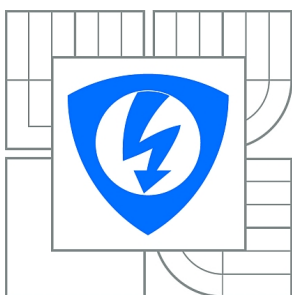




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

VYUŽITÍ BYPASSOVÝCH DIOD VE FOTOVOLTAICKÝCH PANELECH

USAGE OF BYPASS DIODES FOR PHOTOVOLTAICS MODULES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN CHOCHOLÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KŘIVÍK, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Jan Chocholáč

ID: 78243

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Využití bypassových diod ve fotovoltaických panelech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou fotovoltaických článků a panelů a možnostmi jejich využívání.

Seznamte se s možnostmi využití ochranných bypassových diod ve fotovoltaických panelech.

Osvojte si základy práce s programem VEE Pro 8.0.

Vytvořte program simulující I-U a P-U charakteristiky fotovoltaického panelu s bypassovými diodami při jeho částečném zastínění.

Na reálném fotovoltaickém panelu obsahujícím bypassové diody proveďte měření při zastínění části panelu a srovnajte s nasimulovanými závislostmi.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Petr Křivík, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá využitím bypassových diod ve fotovoltaických panelech. Seznamuje nás s činností fotovoltaických panelů, jejich elektrických vlastností a parametrů. Cílem práce je ověření vlivu bypassových diod na částečně zastíněný fotovoltaický panel a jeho volt-ampérovou charakteristiku. Pomocí vytvořených programů v Agilent VEE 8.0 nasimulovat zastínění panelu a porovnat I-U charakteristiku s reálným měřením.

Abstract:

This thesis deals with usage of bypass diodes in photovoltaic panels. Familiarize us with principles of photovoltaic modules and functions, their electrical characteristics and features. The central objective of this work is description of influence of bypass diodes on particularly shading photovoltaic panels and its volt-ampere characteristics. By the help of created software in Agilent VEE 8.0 simulate the shading panel and compare with real measurement.

Klíčová slova:

fotovoltaický panel, fotovoltaika, bypassové diody, simulace, stínění

Key words:

photovoltaic modules, photovoltaic, bypass diode, simulation, shading

Bibliografická citace díla:

CHOCHOLÁČ, J. *Využití bypassových diod ve fotovoltaických panelech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Křivík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Využití bypassových diod ve fotovoltaických panelech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

.....

PODĚKOVÁNÍ:

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Křivíkovi, Ph.D. za jeho profesionální přístup při vedení diplomové práce. Za čas, který si pro mě vyčlenil a pomoc při řešení vzniklých problémů.

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	SOLÁRNÍ ENERGIE	9
2.1	SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ JAKO ZDROJ ENERGIE	9
2.1.1	<i>Vliv atmosféry na sluneční záření</i>	9
2.1.2	<i>Spektrum slunečního záření</i>	11
3	PRINCIP FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU	12
3.1	POLOVODIČ TYPU P A N	12
3.2	P-N PŘECHOD	13
3.2.1	<i>Osvětlený P-N přechod</i>	14
3.3	FYZIKÁLNÍ PRINCIP SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	15
3.4	PRINCIP SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	15
3.5	TYPY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	16
3.5.1	<i>Monokrystalické články</i>	17
3.5.2	<i>Polykrystalické články</i>	17
3.5.3	<i>Vícevrstvé struktury</i>	17
3.6	ELEKTRICKÉ PARAMETRY SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	18
3.7	VLIVY PROSTŘEDÍ A PARAMETRŮ SOLÁRNÍHO ČLÁNKU NA I-U CHARAKTERISTIKU	20
3.7.1	<i>Vliv teploty</i>	20
3.7.2	<i>Vliv intenzity záření</i>	22
3.7.3	<i>Vliv sériového a paralelního odporu</i>	23
3.8	PROPOJENÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	24
3.9	VLIV ZASTÍNĚNÍ NA I-U CHARAKTERISTIKU SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	25
3.9.1	<i>I-U charakteristika zastíněného solárního článku</i>	26
3.9.2	<i>Sériové propojení solárních článků při nehomogenních podmínkách</i>	27
3.10	BYPASSOVÉ DIODY	28
4	EKVIVALENTNÍ OBVODY	31
4.1	JEDNODUCHÝ EKVIVALENTNÍ OBVOD [3]	31
4.2	JEDNO-DIODOVÝ MODEL [3]	32
4.3	DVOU-DIODOVÝ MODEL [3]	34
4.4	ROZŠÍŘENÝ DVOU-DIODOVÝ MODEL [3]	35
5	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ I-U CHARAKTERISTIK SOLÁRNÍHO PANELU	37
5.1	MĚŘÍCÍ PRACOVNÍŠTĚ	37
5.2	SOLÁRNÍ PANEL	39
5.3	MĚŘENÍ I-U A P-U CHARAKTERISTIK SOLÁRNÍHO PANELU	40
5.3.1	<i>I-U a P-U charakteristika osvětleného solárního panelu</i>	40
5.3.2	<i>I-U a P-U charakteristika řetězce 18ti solárních článků</i>	42
5.3.3	<i>I-U charakteristika zastíněného řetězce</i>	43

5.3.4	<i>I-U a P-U charakteristika zastíněného solárního panelu.....</i>	<i>43</i>
5.3.5	<i>I-U a P-U charakteristika solárního panelu bez bypassových diod.....</i>	<i>44</i>
5.3.6	<i>Porovnání I-U a P-U charakteristik solárního panelu.....</i>	<i>45</i>
6	SIMULACE I-U CHARAKTERISTIK	47
6.1	PRINCIP SIMULACE	48
6.2	VLIV PARAMETRŮ	48
6.3	POSTUP SIMULACE	49
6.4	HLEDÁNÍ CHARAKTERISTICKÝCH PARAMETRŮ.....	50
6.5	SIMULACE NEZASTÍNĚNÉHO PANELU	50
6.6	SIMULACE ZASTÍNĚNÝCH SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	54
6.7	SIMULACE ZASTÍNĚNÍ SOLÁRNÍHO PANELU	56
6.8	POROVNÁNÍ REÁLNÉHO MĚŘENÍ A SIMULACE.....	61
7	ZÁVĚR	63
8	POUŽITÁ LITERATURA.....	65
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
10	SEZNAM TABULEK	68

1 Úvod

Elektrická energie je nepochybně jednou z nejvýznamnějších forem energie na této planetě. Jsme na ní závislí, jako jsou živé organismy závislé na potravě nebo rostliny na fotosyntéze. Hlavním důvodem jejího velké uplatnění je to, že se dá snadno vyrábět, rozvádět a využívat. Elektrická energie za normálních okolností nevzniká samovolně a proto si ji lidstvo musí vyrábět samo. Většinu elektrické energie si lidstvo vyrábí spalováním fosilních paliv, tzv. zásob, které tady rostliny po miliony let vytvářely a které nyní čerpáme rychlostí o několik řádů převyšující rychlost jejich tvorby. To, že tyto omezené zásoby fosilních paliv jednou vyčerpáme, není zásadním problémem. Podstatně závažnější je, že těžba a spalování fosilních paliv, jako je třeba uhlí, pozvolna mění naše životní prostředí, především atmosféru. Spalování těchto paliv produkuje nemalé množství oxidu uhličitého, jehož obsah v atmosféře neustále stoupá. A nárůst oxidu uhličitého v naší atmosféře má významný podíl na globálním oteplování a změnu klimatu.

Většina elektrické energie je dnes vyráběna pomocí tepelných elektráren, které mají prozatím malou účinnost. S příchodem nových technologií by mělo přijít nahrazení fosilních paliv tak, aby se nejen uspokojila neustále rostoucí poptávka po energii, ale i omezilo znečišťování životního prostředí. Jednou z takovýchto technologií je i výroba elektrické energie ze Slunce, kdy nedochází k produkci žádných škodlivých emisí.

Fotovoltaická energie v těchto letech zažívá velký rozmach i přesto, že účinnost přeměny sluneční energie na elektrickou je v porovnání s např. tepelnými elektrárnami velmi nízká. V této oblasti se provádí neustálý výzkum a účinnost přeměny sluneční energie se díky tomu zvyšuje. Právě univerzálnost, dostupnost a dosažení dobré účinnosti je největší výhodou přímého využití sluneční energie. Všechny nepřímé způsoby využití sluneční energie např. energie větru, vody či biomasy už nejsou zdaleka tak široce dostupné a nemají takový potenciál, aby zabezpečili větší část energie pro naši civilizaci.

K výrobě elektrické energie ze slunce dnes využíváme solární panely. Jejich výstupní výkon je jedním z nejdůležitějších parametrů a snahou je, tento výkon maximalizovat a eliminovat vlivy, které ho redukují.

V této práci se budu zabývat vlivem zastínění solárního panelu na I-U a P-U charakteristiku a možnosti využití bypassových diod k redukci poklesu výstupního výkonu při zastínění.

2 Solární energie

2.1 Sluneční záření jako zdroj energie

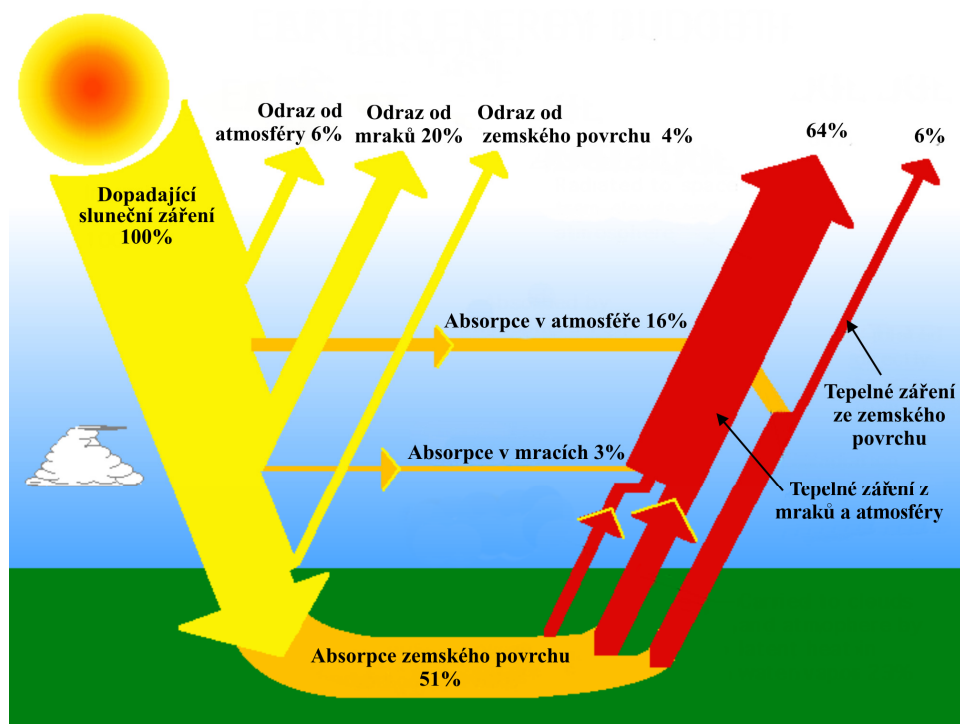
Slunce, jako zdroj světla a tepla pro Zemi, je největším zdrojem energie ve sluneční soustavě. Na svém povrchu má přibližně 5900 K a v jeho jádře dochází k termonukleárním reakcím při teplotě kolem $1,4 \times 10^7$ K a tlaku 20×10^{10} MPa. V tomto prostředí se uvolňuje obrovské množství energie zejména termonukleární syntézou jader vodíku na jádra hélia. Poté trvá stovky tisíc let než se tato uvolněná energie dostane k povrchu Slunce a odtud se vyzáří ve formě příčného elektromagnetického záření a nabitých částic nazývané „sluneční vítr“. Vyzařující výkon ze Slunce je poměrně stabilní a jen mírně kolísá v závislosti na sluneční aktivitě.

Tok energie ze Slunce na Zemi činí průměrně $1,367 \text{ kW/m}^2$ a tato hodnota se nazývá solární konstanta. Energie ze Slunce je přenášena na Zemi ve formě elektromagnetického záření. Podstatnou vlastností elektromagnetických vln je jejich dualistický charakter. Ty se současně chovají jako vlny i jako částice. Vlnový charakter se více projevuje u záření s delší vlnovou délkou, částicový charakter se naopak více projevuje u záření s kratší vlnovou délkou.

2.1.1 Vliv atmosféry na sluneční záření

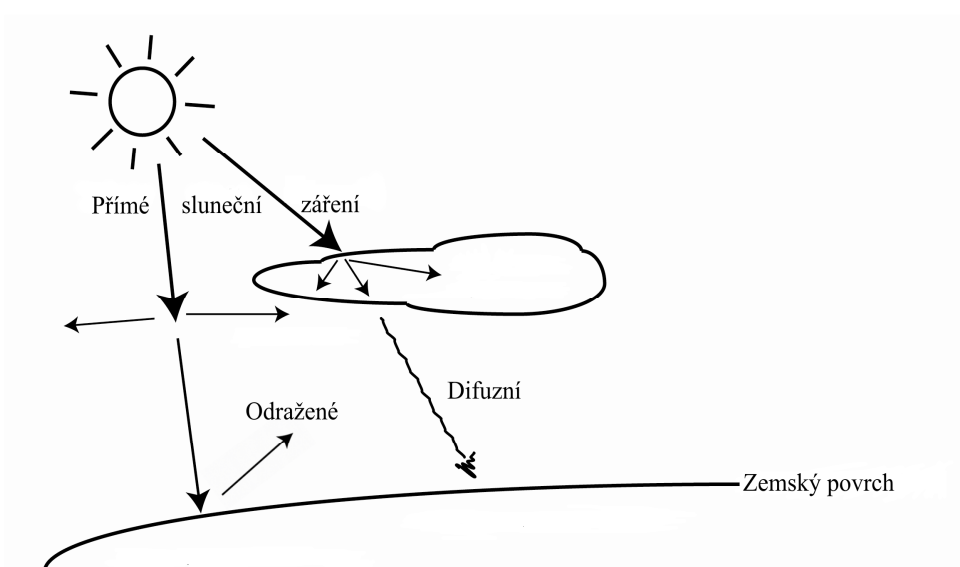
Při průchodu slunečního záření zemskou atmosférou probíhá řada komplexních dějů, jak je vidět na obr. 1. Část záření pronikající na Zemi se odráží od zemské atmosféry a zbylá část prochází atmosférou, kde dochází k absorpci a rozptylu záření na molekulách plynů atmosféry a částech nečistot.

Dopadající sluneční záření se dělí na přímé, difuzní a odražené. Jednotlivé složky jsou vidět na obr. 2. Nejvíce přímého slunečního záření je při jasném, bezmračném počasí. Toto záření je směřováno v úzkém úhlu pouze ze slunečního kotouče. Jeho výhodou je možnost koncentrace pomocí zrcadel nebo čoček na určitý bod. Difuzní záření vzniká rozptylem přímého slunečního záření v mracích a na částech nečistot v atmosféře. Toto záření přichází ze všech směrů a nelze ho koncentrovat. Za jasných dnů je difuzní záření velmi nízké a dosahuje z celkového dopadajícího záření asi 20 procent.



Obrázek 1: Přeměna sluneční energie při průchodu atmosférou [9]

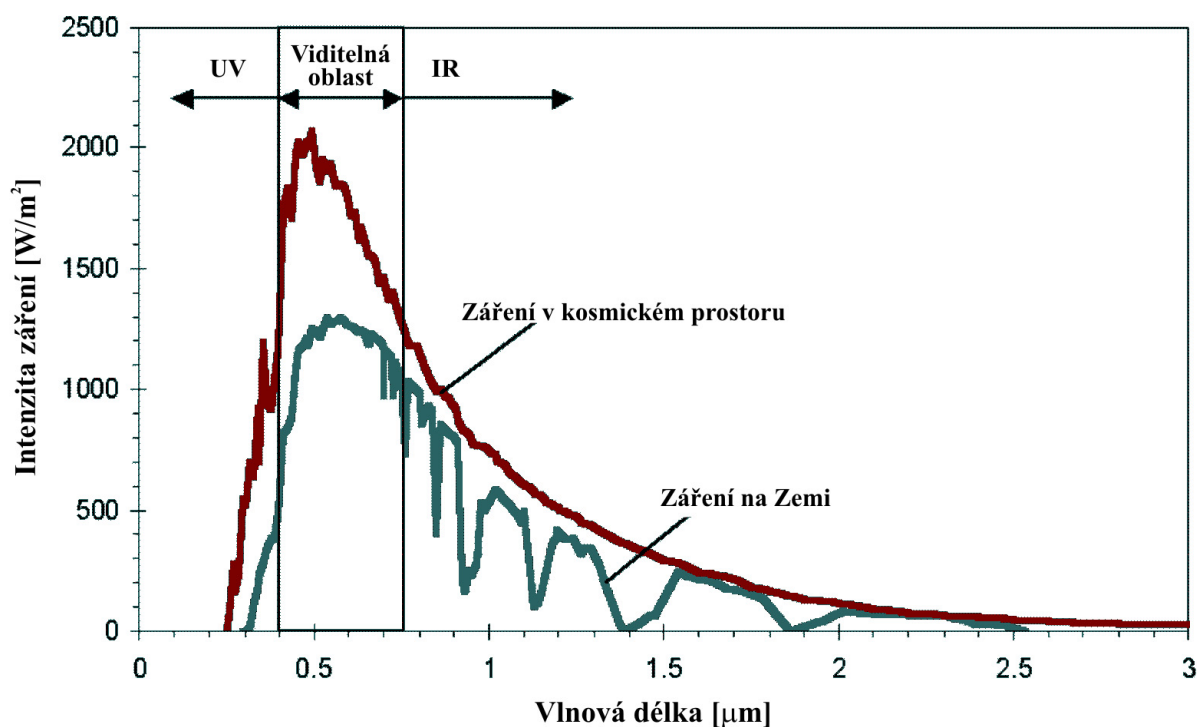
Pokud je oblačno nebo zcela zataženo, může difuzní složka dosahovat až 100 procent z celkového slunečního záření. Odražené sluneční záření vzniká při lomu nebo odrazu na překážce a podílí se jen částečně na celkovém slunečním záření.



Obrázek 2: Dopadající sluneční záření a) Přímé, b) Difuzní, c) Odražené [8]

2.1.2 Spektrum slunečního záření

Spektrum slunečního záření je na Zemi a v kosmickém prostoru různé. Na obr. 3 je vidět spektrum elektromagnetického záření emitovaného ze Slunce. Na ose y je vynesena energetická hustota záření, na ose x je vlnová délka. Jsou zde zaneseny celkem dvě křivky. Křivka záření v kosmickém prostoru udává energetické rozložení slunečního záření ve vakuu a druhá křivka udává energetické rozložení záření na Zemi. Strmý pokles intenzity záření na křivce záření na Zemi při určitých vlnových délkách, je dána absorpcí záření v plynech zemské atmosféry (H_2O , O_2 , CO_2 , O_3). Největší intenzita záření je pro viditelné spektrum od $0,5\ \mu\text{m}$ do $1\ \mu\text{m}$ vlnové délky.



Obrázek 3: Spektrum slunečního záření dopadající na zemský povrch a v kosmickém prostoru [3]

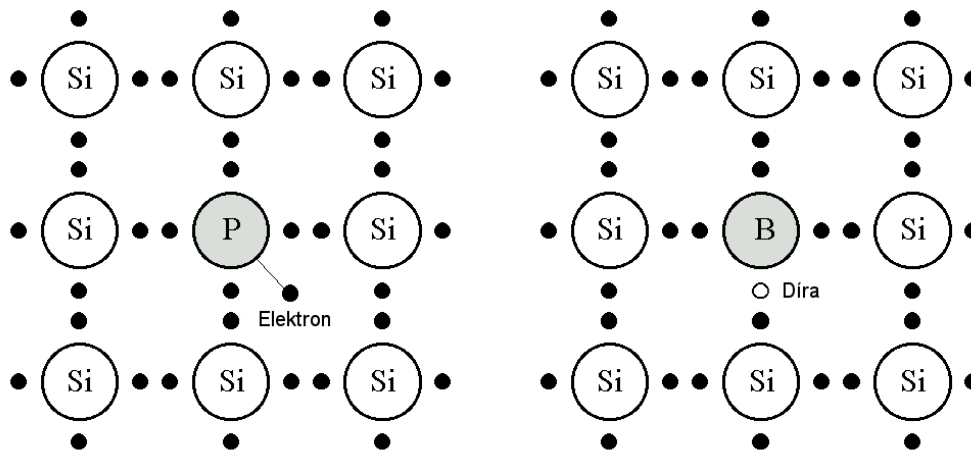
Je vidět, že záření ve viditelném spektru má sice velkou intenzitu, ale z celkového dopadajícího záření tvoří pouze 47%. Sluneční záření na Zemi má znatelně menší intenzitu při určitých vlnových délkách než v kosmu.

3 Princip fotovoltaického článku

3.1 Polovodič typu P a N

Běžné fotovoltaické články se nejčastěji vyrábějí na bázi krystalického křemíku. Tuhý křemík je tvořen atomy, které jsou spojeny kovalentní vazbou a v ideálním případě se v něm nevyskytují žádné volné elektrony. K uvolnění elektronů křemíku stačí dodat poměrně malé množství energie. Při pokojové teplotě mají elektrony v křemíku již dostatečnou energii, aby se uvolnily z vazeb a dostaly se do vodivostního pásu. Vodivost se výrazně mění pokud křemík obsahuje určité příměsi.

Nahrazením některých atomů *Si* atomy prvku V. skupiny Mendělejevovy periodické tabulky prvků např. *As*, *P*, které mají pět valenčních elektronů, vzniká polovodič typu N. Jeho čtyři valenční elektrony jsou vázány k nejbližším atomům *Si* a pátý je jen slabě vázán k atomu příměsi. Dodáním poměrně malé energie se tento slabě vázaný elektron uvolní a přejde do vodivostního pásu.



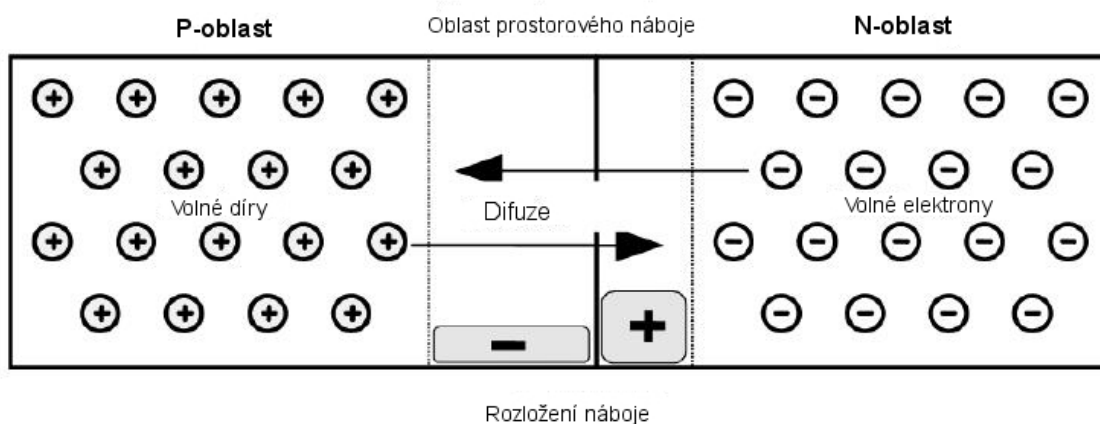
Obrázek 4. Dotování křemíku fosforem, borem a vznik volného elektronu a díry [3]

Polovodič typu P vzniká nahrazením některých atomů *Si* atomy z III. skupiny periodické tabulky prvků např. *B*, *Ga*. Tyto příměsi obsahují tři valenční elektrony. V tomto polovodiči není jedna vazba atomů zaplněna a chová se jako díra. Dodáním energie, např. tepelné, může do nezaplňené vazby přeskočit valenční elektron od sousedního atomu *Si* a díra se může pohybovat krystalem.

3.2 P-N přechod

Spojením příměsového polovodiče typu P a N vzniká P-N přechod. Tento přechod se chová jako hradlo, tzn. že propouští elektrický proud pouze jedním směrem. V příměsovém polovodiči typu N je přebytek volných elektronů, v polovodiči typu P je přebytek kladných děr. Spojením těchto polovodičů dochází k difuzi elektronů a děr z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti s nižší koncentrací tzv. difuze elektronů do části P a děr do části N [2]. Vnitřní elektrické pole, které se tímto pohybem vytváří zpomaluje difuzi, až ji zcela zastaví. Množství elektronů v oblasti P svým elektrickým polem působí proti difuzi dalších elektronů. Stejně tak díry difundované do oblasti typu N svým polem působí proti difuzi dalších děr. Na přechodu dochází ke generačně-rekombinačnímu procesu a vzniká pár elektron-díra.

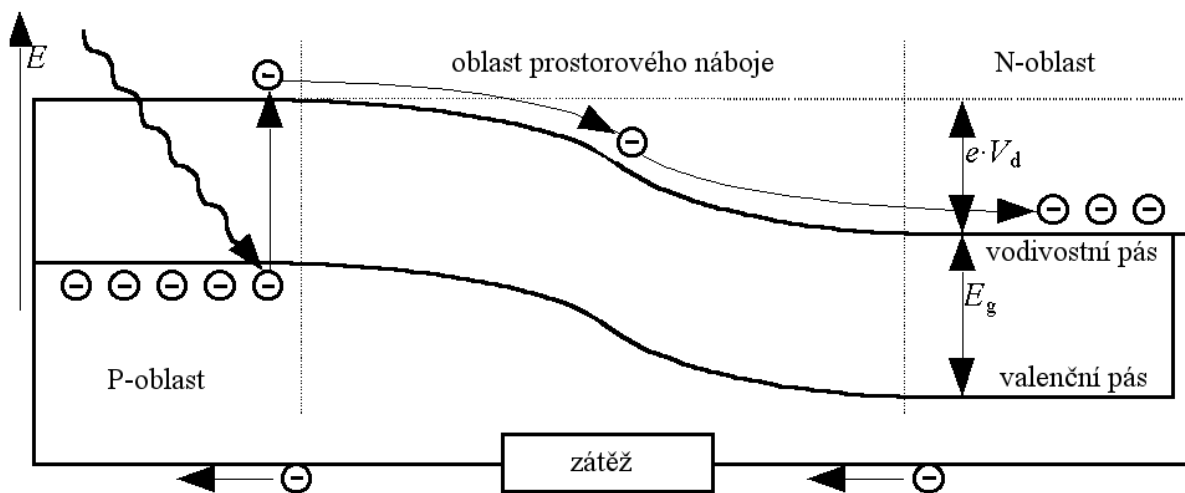
Z obr. 5 je vidět, že vzniklé elektrické pole má snahu vytlačit volné elektrony hlouběji do elektronové oblasti a díry do děrové oblasti polovodiče. Samotná přechodová oblast má proto podstatně menší koncentraci volných nosičů náboje a proto i podstatně větší elektrický odpor jako zbytek polovodiče. Této oblasti se říká oblast prostorového náboje. Jestliže na P-N přechod připojíme vnější elektrické napětí, kdy záporné napětí je přivedeno na polovodič typu P a kladné na polovodič N, jsou elektrony a díry ještě silněji vytlačovány od rozhraní P-N přechodu směrem k jeho okrajům. Šířka oblasti prostorového náboje se tak ještě zvětší a elektrický odpor vzroste, takže P-N přechodem může protékat jen nepatrný proud. Jedná se o tzv. závěrný směr. Vnější elektrické pole s opačnou polaritou zeslabuje elektrické pole a po dosažení určité kritické hodnoty U_k ho úplně vykompenzuje. Volné nosiče náboje vyplní opět prostor P-N přechodu, takže jeho odpor klesne na úroveň ostatních oblastí polovodiče. Při této polaritě P-N přechod propouští elektrický proud - jedná se o přímý (propustný) směr.



Obrázek 5: P-N přechod [3]

3.2.1 Osvětlený P-N přechod

Osvětlíme-li P-N přechod, energie dopadajících fotonů poruší vnitřní rovnováhu nábojů. Pokud dopadající fotony mají větší energii než jaká odpovídá šířce zakázaného pásu E_g , tyto fotony generují pár elektron-díra. Tím předají svou energii a pohlcují se. Případný přebytek energie je většinou ve formě tepla, který vede k ohřevu materiálu polovodiče. Páry elektron-díra v oblasti přechodu P-N jsou od sebe odděleny elektrickým polem. Generované díry jsou urychleny ve směru vnitřního pole E a elektrony opačně. Strana polovodiče typu P se nabíjí kladně a strana typu N záporně. Potenciálová bariéra P-N přechodu se sníží a Fermiho hladina v oblastech P a N se rozdělí a rozdíl mezi nimi odpovídá fotovoltaiickému napětí. Toto napětí může maximálně odpovídat vyrovnání původního zakřivení pásů, což u křemíku bývá okolo 0,6V. Růst intenzity ozáření přechodu již k dalšímu zvýšení fotovoltaiického napětí naprázdno nevede. „Protože snížení potenciálové bariéry V_d při osvětlení vede ke zvýšení rekombinačního toku elektronů do polovodiče typu P a rekombinačního toku děr opačně a tím se kompenzuje zvýšení difuzního proudu v důsledku oddělení generovaných elektronů a děr v elektrickém poli mezi vázanými prostorovými náboji v oblasti přechodu P-N.“[13]



Obrázek 6: Ozářený P-N přechod solárního článku [3]

3.3 Fyzikální princip solárního článku

Fotovoltaický článek je velkoplošný P-N přechod, který je vytvořen v malé hloubce pod povrchem křemíku. Dopadá-li na křemík foton o energii menší než 1,1 eV (elektronvoltů), tento foton projde křemíkem a není absorbován. Pokud však je jeho energie větší než 1,1 eV (tato energie odpovídá šířce zakázaného pásu $E_g = E_c - E_v$, kde E_c je energie vodivostního pásu a E_v je energie valenčního pásu), foton je absorbován a v polovodiči vzniknou volné nosiče náboje- záporný elektron a kladná díra. Energie potřebná k uvolnění elektronu představuje tedy záření o vlnové délce menší než 1100 nm, při které dochází k uvolnění elektronů z vazeb.

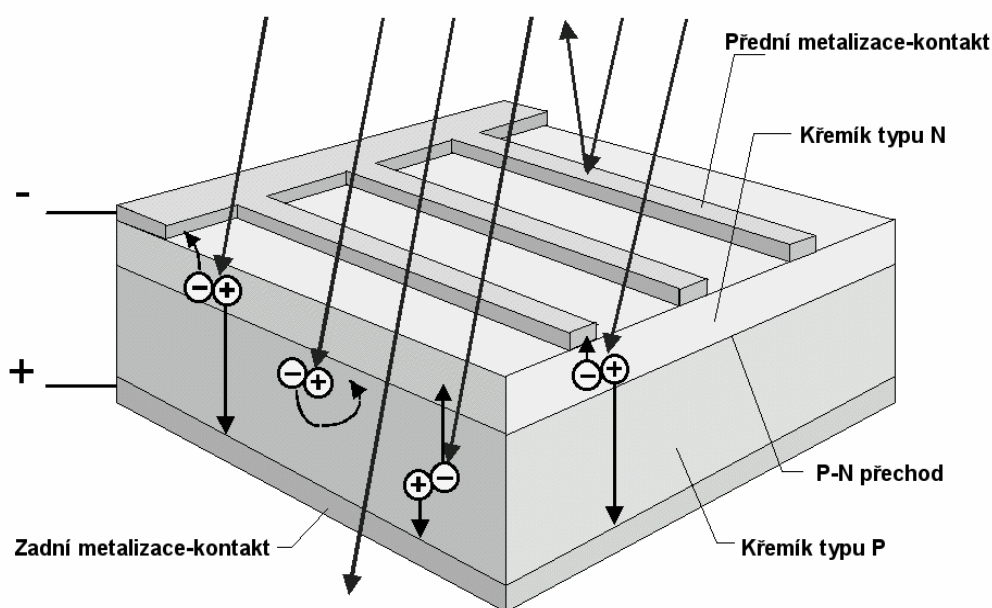
Dnes je nejvíce využívaný polovodičový materiál pro výrobu solárních článků křemík, protože z hlediska šířky zakázaného pásu je u křemíku možno dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů a zároveň se u něho podařilo velmi dobře zvládnout všechny operace potřebné k vytváření struktur.

3.4 Princip solárního článku

Základní fotovoltaický článek se vyrábí z příměsových polovodičů typu P a N. Na obr. 7 je technické řešení fotovoltaického článku. Článek se skládá z horního záporného kontaktu a spodního kladného kontaktu. Mezi těmito kontakty jsou dva polovodiče typu P a N. Při ozáření článku dochází k jevu, který byl popsán výše. Když na článek dopadá sluneční

záření, v polovodiči se generují volné elektrony a díry. Elektrické pole je oddělí a pošle elektrony do vrstvy typu N, která je záporným pólem článku a díry do vrstvy P, která je kladným pólem článku.

Napětí fotovoltaického článku je dáno polovodičovým materiálem, u křemíku činí okolo 0,6V. V případě zatížení článku toto napětí mírně klesá. Pro dosažení maximálního výstupního výkonu panelu je potřeba zajistit vysokou generaci nosičů náboje v objemu článků a pomocí přechodu P-N jejich sběr. Jelikož vyprodukované napětí článku je příliš nízké, články se zapojují do série. Pro výstupní napětí solárního panelu 18V je potřeba 36 fotovoltaických článků, pro výstupní napětí 36V je solární panel složen ze 72 fotovoltaických článků tvořící jeden celek [2].



Obrázek 7: Vnitřní složení solárního článku [3]

3.5 Typy solárních článků

Vývoj solárních článků dospěl k celé řadě rozdílných technologií. Nejvíce propracovanou je technologie založená na krystalickém křemíku. Základem je plátek křemíku tloušťky 0,2-0,3 mm s monokrystalickou nebo multikrystalickou strukturou. Zpravidla se jedná o plátky čtvercového tvaru s rozměry až 200×200 mm. U současných hromadně vyráběných solárních

článků z křemíku je energetická účinnost přeměny slunečního záření na elektrickou energii 14% až 17 %. Účinnosti u laboratorních vzorků bylo dosaženo až 28 %.

3.5.1 Monokrystalické články

Monokrystalické články se vyrábí z čistého monokrystalu křemíku. Ten je se získává Czochralského metodou pomalým tažením zárodku krystalu z taveniny. Touto metodou je dosaženo velmi čistého (99,9999% *Si*) křemíku a účinnost z něho vyrobených solárních článků je větší než u polykrystalických článků.

3.5.2 Polykrystalické články

Polykrystalické články jsou vyráběny odléváním čistého křemíku do vhodných forem a řezáním těchto tenkých ingotů na plátky. Výhoda této technologie je v menších výrobních nákladech, ale účinnost takto vyráběných solárních článků je okolo 13-15%.

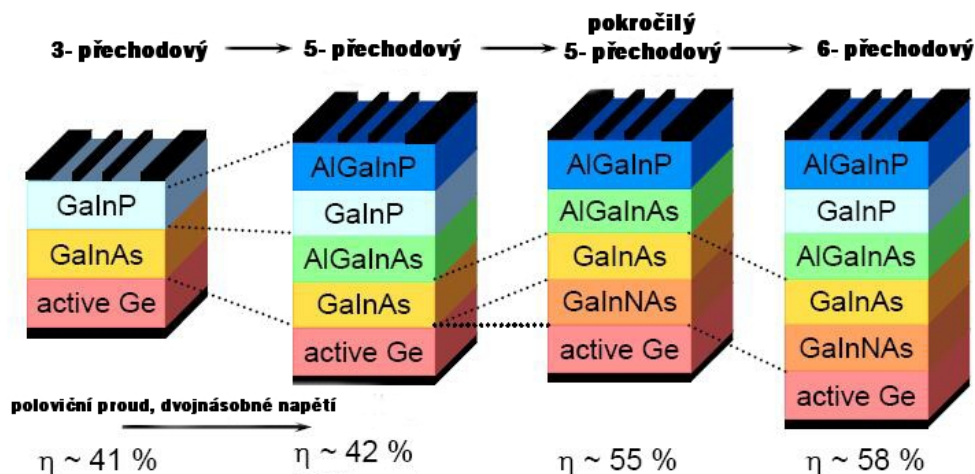
3.5.3 Vícevrstvé struktury

U fotovoltaických článků s P-N přechody je účinnost tak velká, do jaké míry článek dokáže využít sluneční spektrum a jaká část energie fotonu se přemění na elektrický proud a teplo. Pokud je šířka zakázaného pásu menší jak 1,1eV, většina elektronů je excitována, ale za cenu menšího napětí a účinnosti. Pokud je šířka zakázaného pásu naopak větší jak 1,1eV, nedochází k využití všech fotonů.

O vhodnosti použití polovodičových materiálů v solárních článcích rozhoduje šířka zakázaného pásu, která by měla být v rozmezí od 1,1eV do 1,7eV. Dále by použité materiály měly mít dlouhou dobou života minoritních nosičů náboje. Nejčastěji používané materiály jsou intermetalické sloučeniny prvků III. a V. skupiny např. *Si*, *GaAs*, *GaInP*, *AlSb* a další.

Vícevrstvé struktury jsou struktury, kdy jsou dva nebo více fotovoltaických článků poskládány do kaskády s různou šířkou zakázaného pásu. U takových struktur je každá část optimalizována pro pohlcení určitého slunečního spektra. Proto vícevrstvá struktura dosahuje podstatně lepšího využití energie dopadajícího záření. Tato struktura vytváří vyšší napětí na článek tím, že efektivněji využívá energie fotonů. Na obr. 8 je vidět růst účinnosti s počtem přechodů, kdy napětí se zdvojnásobuje a proud klesá o polovinu. Jelikož jsou ve slunečním spektru obsaženy fotony s různou vlnovou délkou, mají vícevrstvé struktury vyšší účinnost

než klasické křemíkové články díky tomu, že využívají téměř celé energie dopadajícího slunečního záření.



Obrázek 8: Vícepřechodové struktury, jejich složení a účinnost [7]

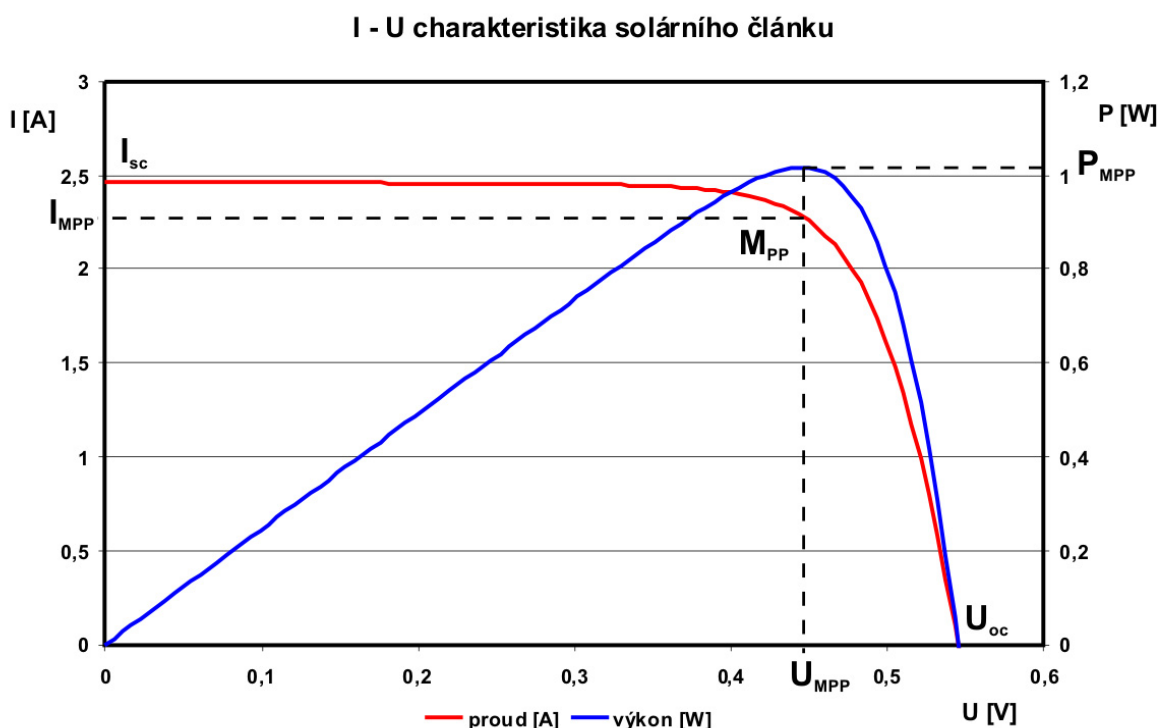
Nejčastěji se používá vícevrstvá struktura, kde ve vrchní vrstvě má polovodič největší šířku zakázaného pásu, a tudíž jsou v ní absorbovány jen elektrony s největší energií. Elektrony s nižší energií touto vrstvou procházejí do dalších vrstev, kde dochází ke generaci páru elektron-díra. Čím se polovodičová vrstva nachází hlouběji ve struktuře, tím se tím se šířka zakázaného pásu zmenšuje [2]. Proto každá vrstva absorbuje jen takové fotony, které mají energii větší než šířka zakázaného pásu a menší energii než šířka zakázaného pásu vyšší vrstvy. Jako materiál vrstev se nejčastěji používají skupiny jako např. *Si*, *GaAs*, *GaInP*, *AlSb* a další. Nejběžnější vícepřechodové struktury obsahují tři vrstvy a takové solární články se nazývají třívrstvé solární články.

3.6 Elektrické parametry solárního článku

Pro základní popis solárního článku s typickou volt-ampérovou charakteristikou postačují tři parametry, které dostatečně popisují jeho elektrické vlastnosti. Prvním parametrem je napětí naprázdno U_{OC} , kdy článkem neprochází žádný proud. Toto napětí je pak dáno převážně použitým polovodičem.

Druhým parametrem je proud nakrátko I_{SC} , který je při nulovém napětí. Proud I_{SC} je dán intenzitou dopadajícího záření $I_{SC} = I_L$, a je ovlivněn velikostí sériového odporu R_S . Jestliže je odpor R_S konečné hodnoty dochází k snižování velikosti proudu nakrátko.

Třetím parametrem je výkon solárního článku, který je dán zlomkem celkového výkonu dopadajícího světla, které může být převedeno na elektrickou energii. Při osvitu je P-N přechod v propustném směru a vnější zátěž určuje polohu pracovního bodu na volt-ampérové křivce. Voltampérová a výkonová charakteristika je vidět na obr. 9, který ukazuje průběh proudu na napětí a celkový výkon článku.



Obrázek 9: I-U a P-U charakteristika solárního článku

Velmi důležitým parametrem fotovoltaických článků je elektrický výkon. Jelikož výstupní výkon článku je dán součinem napětí a proudu (rovnice 1) je zjevné, že při napětí naprázdno U_{OC} a proudu nakrátko I_{SC} článek negeneruje žádný výkon,

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

kde U je napětí článku a I je proud článku.

Solární článek dosahuje maximálního výkonu při určité hodnotě napětí. Toto napětí se označuje jako U_{MPP} a tvoří zhruba 80% napětí naprázdno U_{OC} . Na obr. 9 je vidět, že výkonová křivka má svůj charakteristický bod. Tento bod je označován jako M_{PP} (bod maximálního výkonu), při kterém je maximální výkon P_{MPP} . Maximální výkon je dán rovnicí 2,

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} < U_{OC} \cdot I_{SC} \quad (2)$$

kde U_{MPP} je napětí a I_{MPP} je proud při maximálním výkonu. U_{OC} je napětí naprázdno a I_{SC} je proud nakrátko.

Napětí U_{MPP} je menší než napětí naprázdno U_{OC} a proudu I_{MPP} v bodě maximálního výkonu je menší než proud nakrátko I_{SC} . Každá volt-ampérová charakteristika se liší podle druhu článku, intenzity dopadajícího slunečního záření, teploty, sériového a paralelního odporu.

Další důležitý parametr je faktor plnění (fill factor), který je definován:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U \cdot I_{SC}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (3)$$

Faktor plnění je parametr, který popisuje shodu volt-ampérové křivky s U_{OC} a I_{SC} . Jeho hodnota je vždy menší jako 1 a je většinou v rozmezí 0,75 až 0,85.

Účinnost energetické konverze solárního článku η je definována:

$$\eta = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot U_{OC} \cdot I_{SC}}{P_{in}} \quad (4)$$

kde P_{in} je celková energie dopadajícího světla.

3.7 Vliv prostředí a parametrů solárního článku na I-U charakteristiku

3.7.1 Vliv teploty

Velikost teploty má vliv na napětí a proud článku. Celkový průběh měnícího se napětí a proudu v závislosti na teplotě je zobrazen na obr. 10. Se zvyšující se teplotou proud mírně roste a napětí značně klesá. Změna napětí je dána teplotním koeficientem ($\alpha[mV/K]$). U proudu je tento koeficient kladný a u napětí záporný.

Jelikož je teplotní koeficient u napětí větší než u proudu, celkový teplotní koeficient článku je záporný. Pro křemíkový solární článek se jeho hodnota pohybuje v rozmezí $\alpha_{MPP} = -3.10^{-3} V/K$ až $\alpha_{MPP} = -6.10^{-3} V/K$, což pro teplotu 25°C představuje pokles výkonu přibližně o 10%.

Teplotní závislost saturačních proudů I_{S1} a I_{S2} (s rostoucí teplotou saturační proudy rostou) vysvětluje pokles napětí naprázdno U_{OC} . Saturační proudy I_{S1}, I_{S2} jsou dány rovnicemi 5 a 6, kde c_{S1} a c_{S2} jsou teplotní koeficienty,

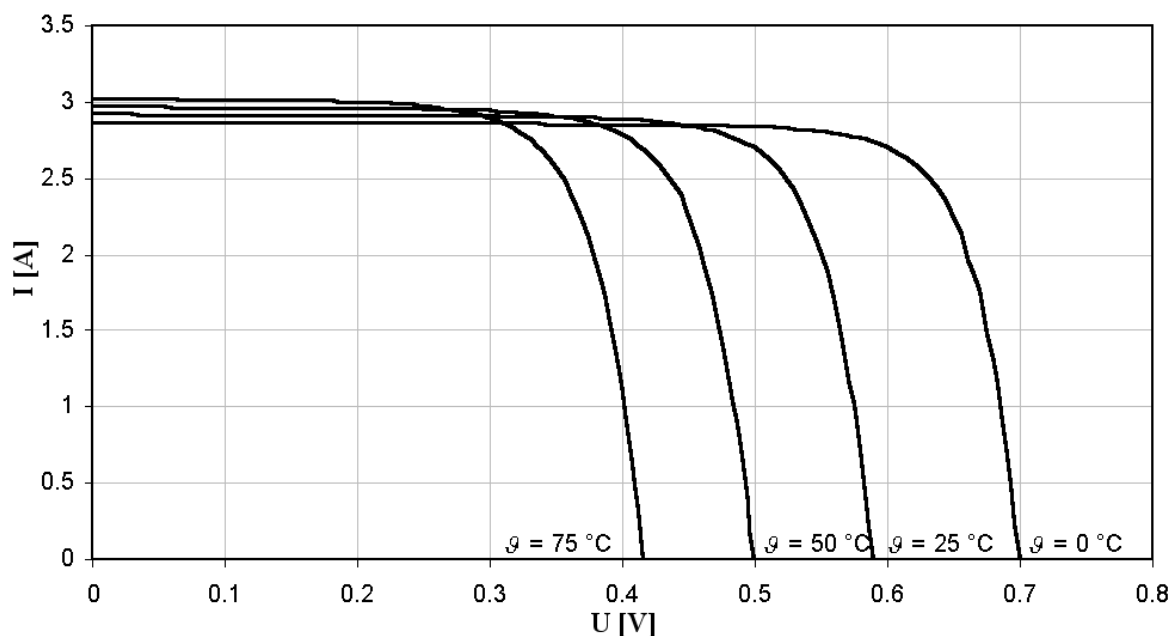
$$I_{S1} = c_{S1} \cdot T^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T}\right) \quad (5)$$

$$I_{S2} = c_{S2} \cdot T^{5/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad (6)$$

kde c_{S1} a c_{S2} jsou teplotní koeficienty, E_g je šířka zakázaného pásu, k je Boltzmanova konstanta ($k = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) a T je teplota v Kelvinech.

Pomocí koeficientů c_1 a c_2 je popsána teplotní závislost fotoproud I_{ph} (rovnice 7) [3].

$$I_{ph}(T) = (c_1 + c_2 \cdot T) \cdot E \quad (7)$$

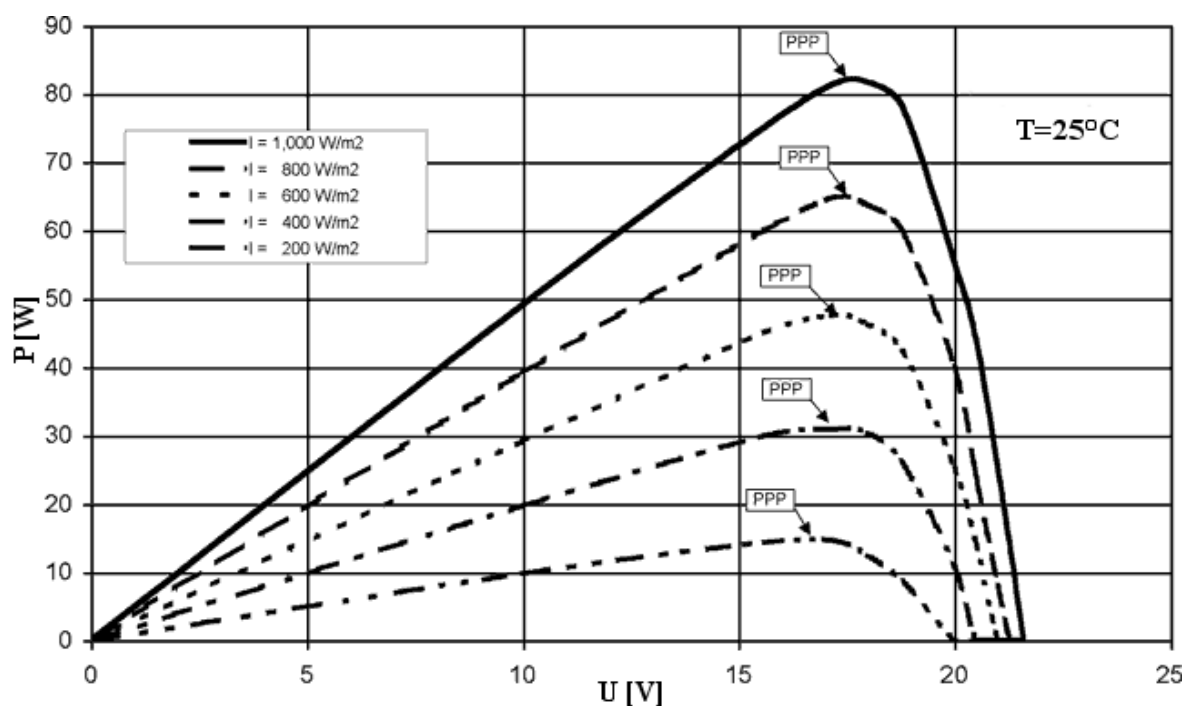


Obrázek 10: Závislost I-U charakteristiky solárního článku na teplotě [3]

Z důvodu porovnávání výkonů solárních panelů byly zavedeny standardní testovací podmínky (STC). Ty určují, že se měření provádí při ustálených podmínkách intenzity záření $E=1000 \text{ W/m}^2$, teploty 25°C a energetickém rozložení slunečního záření na Zemi. Dosažený výkon fotovoltaických panelů je při skutečných podmínkách většinou nižší a udává se v jednotkách W_p (Watt - peak).

3.7.2 Vliv intenzity záření

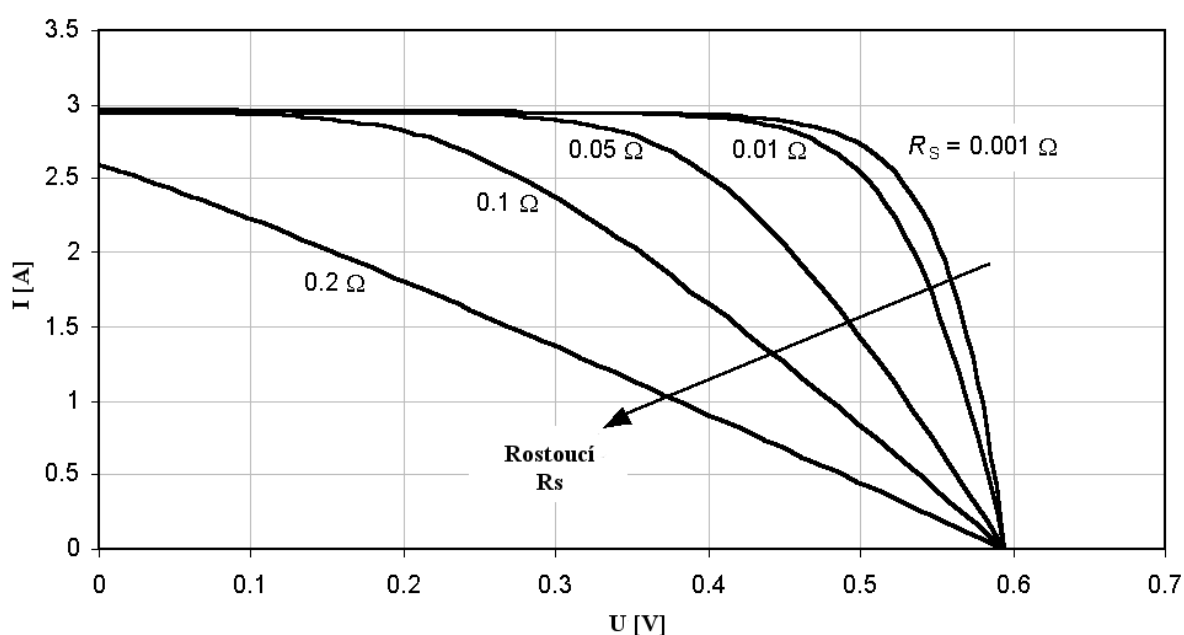
Generovaný výkon článku je přímo úměrný intenzitě dopadajícího slunečního záření. Na obr. 11 jsou vidět jednotlivé výkony při různých intenzitách záření při teplotě 25°C . Jelikož je odpor zátěže stálý a vlivy měnící bod maximálního výkonu jsou teplota a intenzita záření, je potřeba systém nastavit tak, aby se využíval maximální výkon článku. K tomuto účelu se používá elektronické zařízení tzv. sledovač výkonu (peak power tracker).



Obrázek 11: Vliv intenzity slunečního záření na výkon solárního panelu [5]

3.7.3 Vliv sériového a paralelního odporu

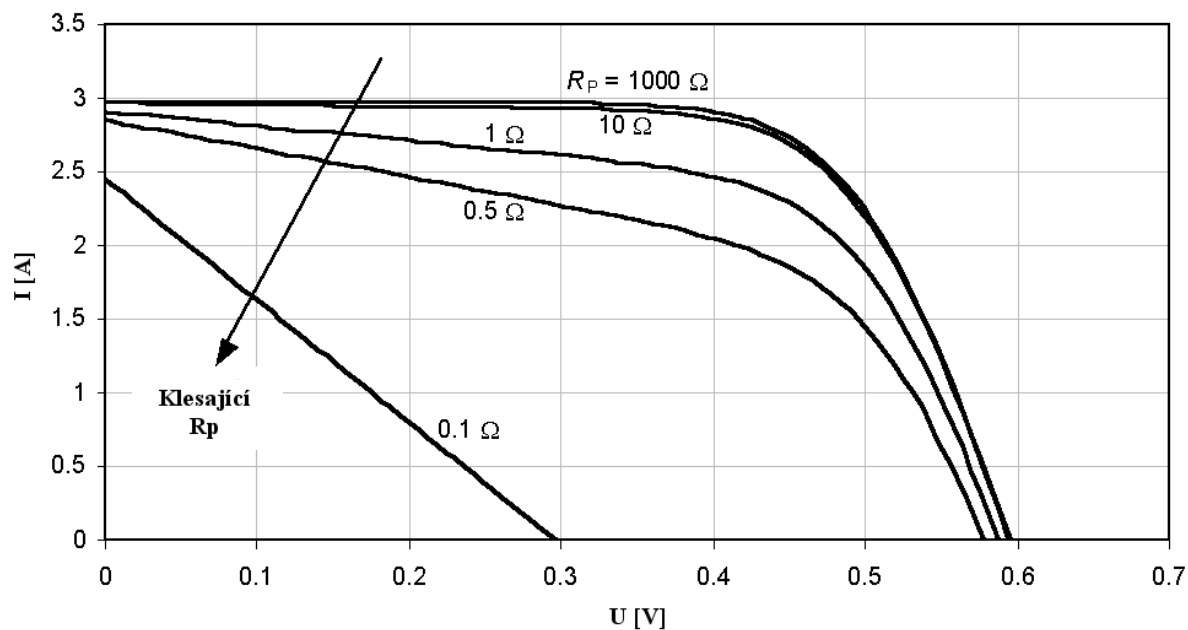
Za reálných podmínek v článcích vzniká ztrátový výkon způsobený sériovým a paralelním odporem. Sériový odpor článku je dán celkovým odporem hmoty polovodiče, odporem kontaktů a propojením. Jeho ideální hodnota by se měla blížit nule. Na obr. 12 je vynesena průběh volt-ampérové charakteristiky článku pro různé hodnoty sériového odporu. Sériový odpor převážně ovlivňuje úhel náklonu volt-ampérové charakteristiky mezi bodem M_{PP} a U_{OC} . S rostoucí hodnotou sériového odporu klesá výkon celého článku.



Obrázek 12: Vliv sériového odporu na I - U charakteristiku solárního článku [3]

Paralelní odpor je dán defekty krystalické mřížky nebo svodovými proudy kolem okrajů článku. Vliv paralelního odporu na volt-ampérovou charakteristiku solárního článku je na obr. 13. Ideální hodnota paralelního odporu by měla být nekonečno. Malá hodnota paralelního odporu snižuje úhel mezi osou y a volt-ampérovou charakteristikou článku v oblasti mezi body I_{SC} a M_{PP} . Celkový výkon solárního článku se zmenšuje.

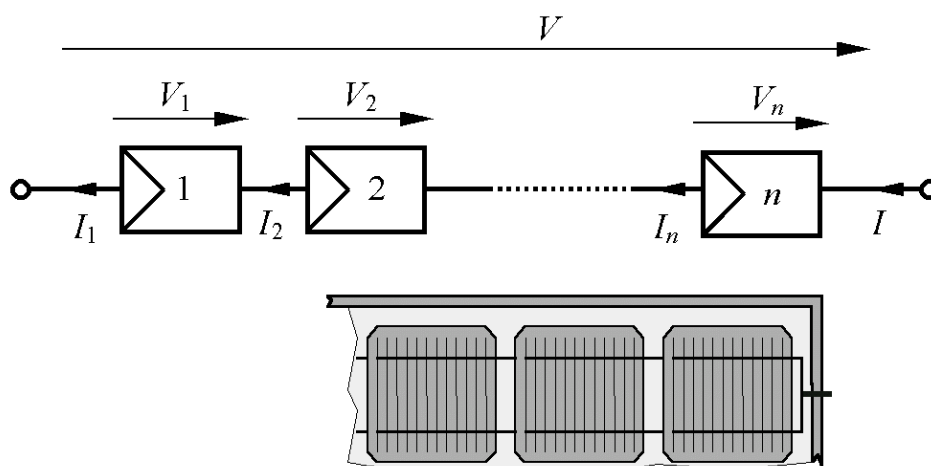
Sériový a paralelní odpor snižují celkový výkon solárního článku a ovlivňuje průběh celé volt-ampérové charakteristiky.



Obrázek 13: Vliv paralelního odporu na I-U charakteristiku solárního článku [3]

3.8 Propojení solárních článků

Solární články se ve většině případů samostatně nepoužívají z důvodu jejich malého výstupního napětí. Nejčastější soubor vzájemně propojených solárních článků představuje fotovoltaický panel. Jednotlivé články v panelu jsou nejčastěji zapojovány do série (obr. 14). Tyto panely jsou spojovány sériově, popřípadě sério-paralelně nebo paralelně a jako celek tvoří fotovoltaický systém.



Obrázek 14: Sériové propojení solárních článků [3]

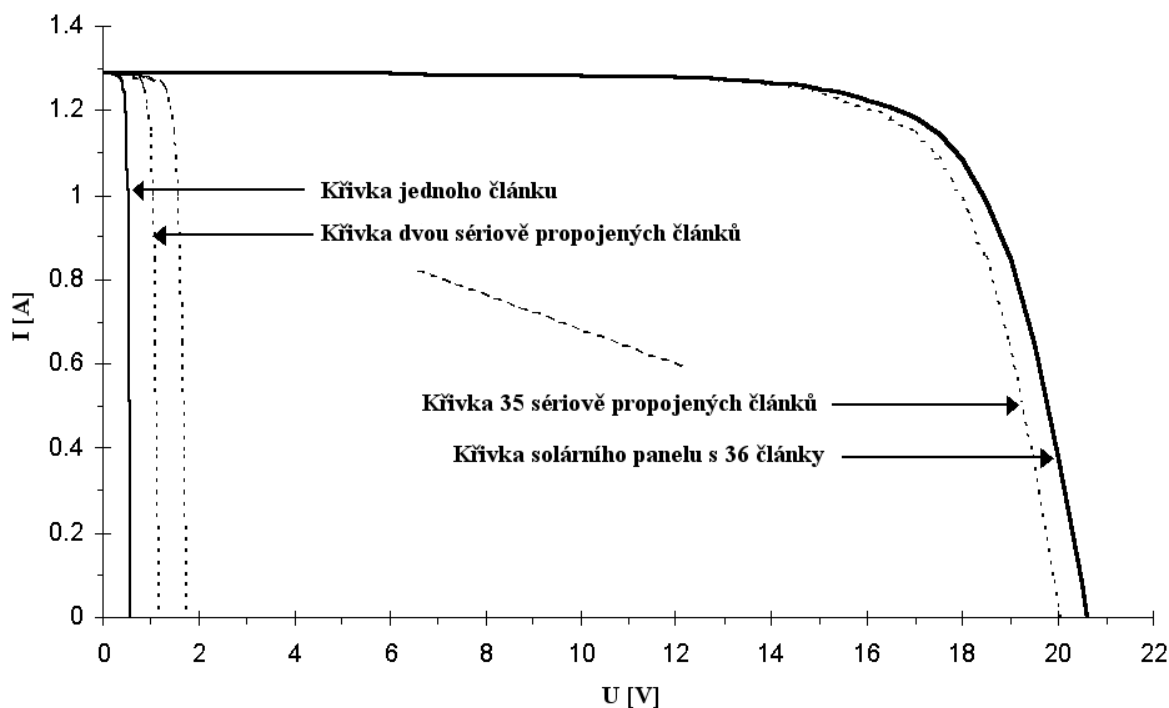
Většina panelů jsou konstruovány tak, aby jejich výstupní napětí bylo 12V. Tyto panely se poté mohou používat pro dobíjení olověných baterií nebo jako zdroj energie. Nejčastější počet křemíkových článků ve fotovoltaickém panelu je 32 až 40. Solární systémy mohou mít mnohem více sériově spojených článků tak, aby se získalo vyšší napětí (obr. 15).

Proud I protékající n články spojených do série je stejný a jeho velikost je dána Kirchhoffovým zákonem.

Celkové napětí solárního panelu pro různý počet článků je vidět na obr. 15 při stejném osvětlení a teplotě. Celkové napětí je pak dáno rovnicí 8,

$$V = n \cdot V_i \quad (8)$$

kde n je počet článků a V_i je napětí jednoho článku.



Obrázek 15: I-U charakteristika pro různý počet sériově propojených solárních článků [3]

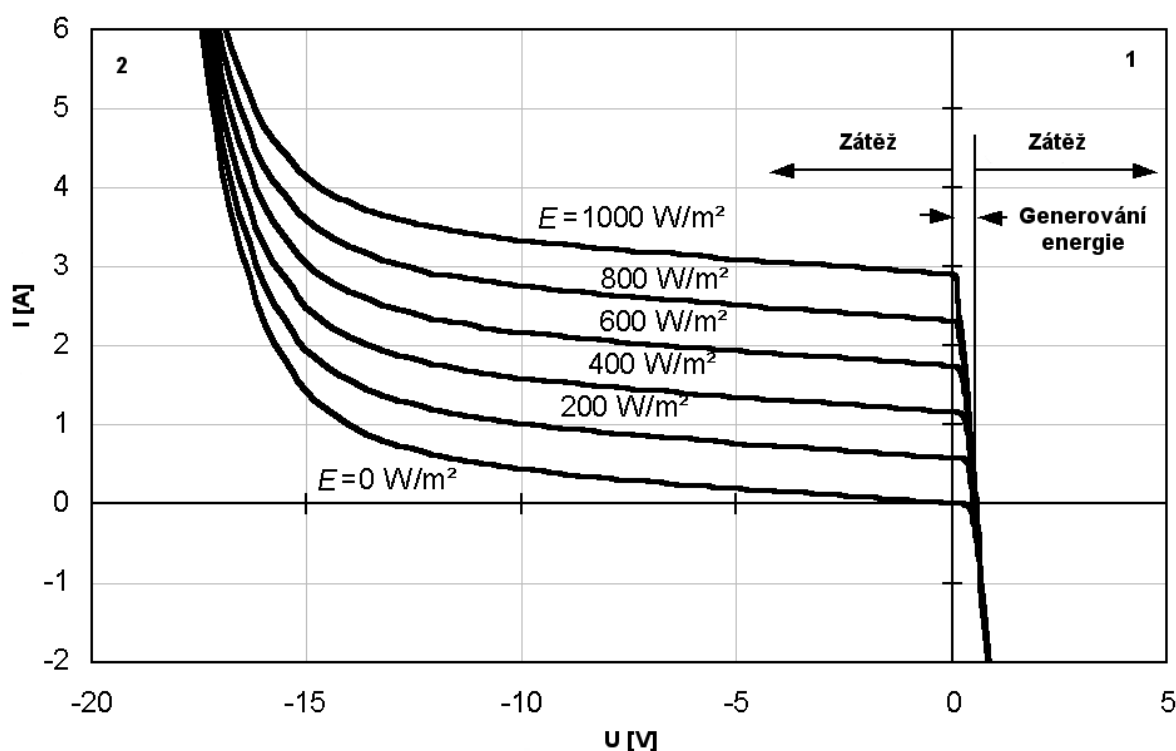
3.9 Vliv zastínění na I-U charakteristiku solárního článku

Při nesouměrném ozáření či zastínění článku(ů) v solárním panelu se výrazně mění jeho celková volt-ampérová charakteristika.

3.9.1 *I-U charakteristika zastíněného solárního článku*

Celková volt-ampérová charakteristika monokrystalického článku je vidět na obr. 16. Graf volt-ampérové charakteristiky lze rozdělit do čtyř kvadrantů. Na kvadranty, kde se elektrická energie generuje, a kde se elektrická energie spotřebovává. V prvním kvadrantu volt-ampérové charakteristiky článek generuje elektrickou energii. V tomto kvadrantu je napětí a proud článku pozitivní. V druhém kvadrantu volt-ampérové charakteristiky se článek naopak chová jako zátěž a musí být k němu připojeno externí napětí. V této oblasti je napětí článku negativní, a proto je potřeba vnějšího zdroje nebo jiného solárního článku, který generuje potřebné elektrické napětí. V tomto stavu se článek zahřívá vlivem vysoké energetické spotřeby. Pokud se teplota článku příliš zvýší, může být tento článek zničen.

Nejběžnějším způsobem, jak se článek dostane do oblasti druhého kvadrantu, je jeho zastínění. Pro účely výroby elektrické energie z fotovoltaických článků se využívá oblast prvního kvadrantu volt-ampérové charakteristiky.



Obrázek 16: *I-U* charakteristika solárního článku pro různou intenzitu záření [3]

3.9.2 Sériové propojení solárních článků při nehomogenních podmínkách

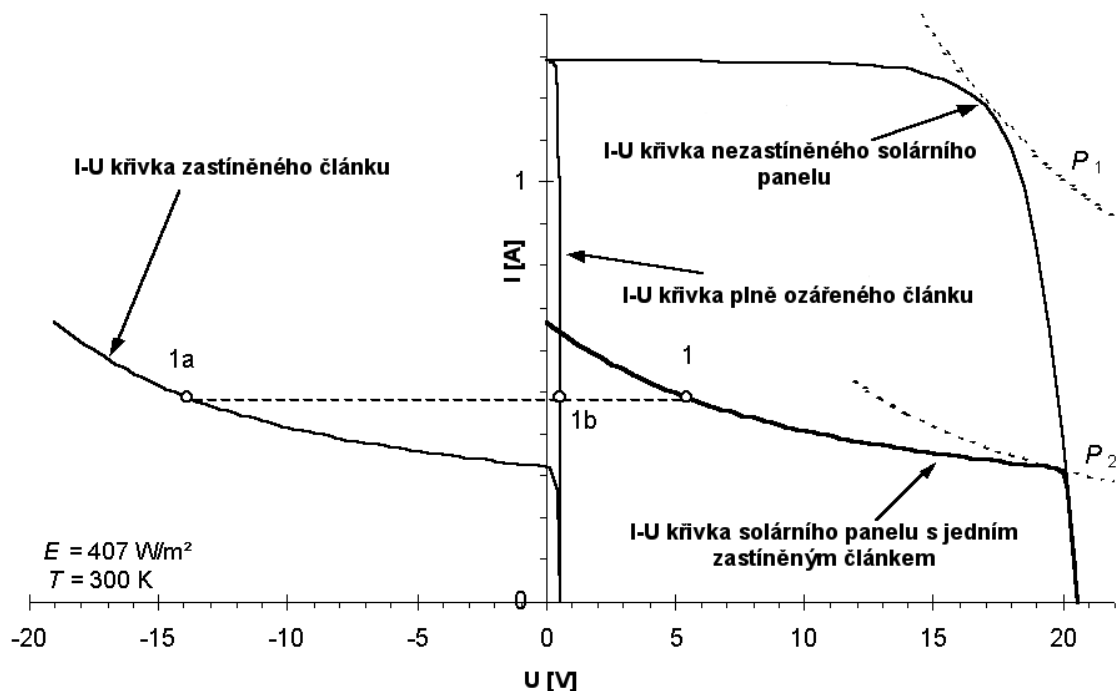
Velmi často dochází k tomu, že solární články ve fotovoltaickém panelu jsou vystaveny nehomogenním světelným podmínkám např. zastíněním překážkami vrhající stín, napadaným listím nebo pokrytí panelu sněhem. Tyto nehomogenní světelné podmínky mají značný vliv na celkovou charakteristiku fotovoltaického panelu a drasticky redukuje jeho výkon. Na obr. 17 je příklad charakteristiky panelu s 36ti sériově propojenými články, kde jeden článek je zastíněn ze 75% a všechny ostatní články jsou plně ozářeny (Quaschning and Hanitsch, 1996). Celkové napětí panelu je dáno součtem napětí zastíněného a nezastíněných solárních článků (rovnice 9),

$$V = V_S + 35.V_F \quad (9)$$

kde V_S je napětí zastíněného článku a V_F je napětí nezastíněných článků.

Obr. 17 ukazuje vytvoření jednoho bodu charakteristiky (1) označeném na konečné volt-ampérové charakteristice. Pro daný proud je napětí vypočteno sečtením zastíněného článku (1a) a nezastíněného článku (1b). Na obr. 17 je také zakreslena konečná volt-ampérová charakteristika. Z grafu je vidět, že výstupní výkon panelu je tímto částečně zastíněným článkem redukován. Při zastínění pouhých 2% plochy solárního panelu, je výstupní výkon na bodu M_{PP} snížen o 70%. Maximální výkon poklesl z $P_1=20,3W$ na $P_2=6,3W$. Ztrátový výkon na tomto článku je 12,7W, který působí na zkrat tohoto solárního panelu. Body maximálního výkonu P_1 a P_2 jsou označeny na křivkách stejného výstupního výkonu [9].

Zastíněním více solárních článků v panelu může vzrůst ztrátový výkon až k 30W. To způsobuje značné zahřívání těchto solárních článků. V místě (většinou se jedná o oblast kolem jednoho mm^2), kde dochází k tak velkému nárůstu tepla, dochází k protavení pouzdra solárního článku a jeho zničení. Toto místo se nazývá „horké místo“ (hot spot).



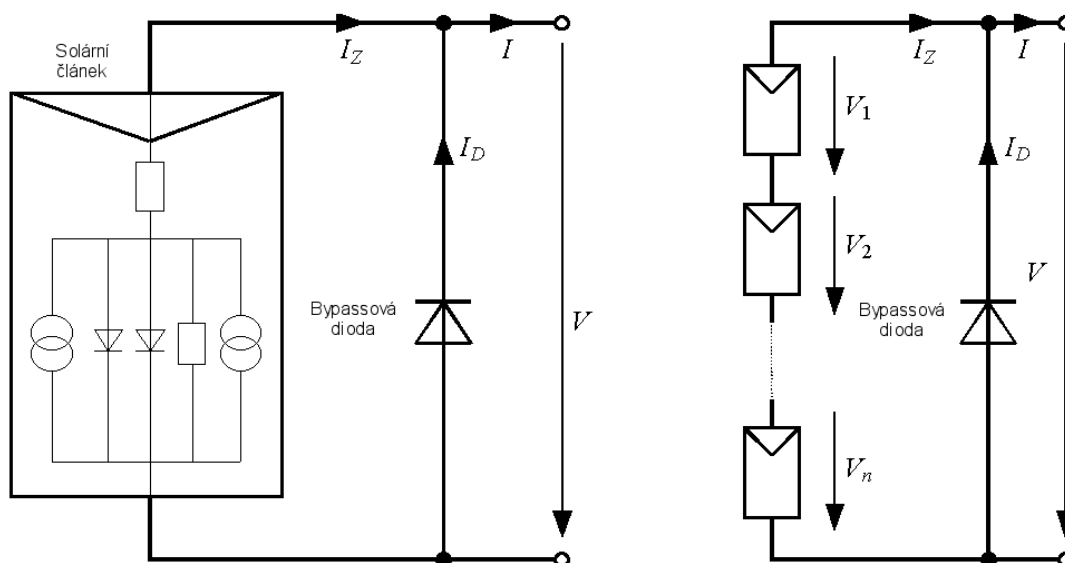
Obrázek 17: I-U charakteristika solárního panelu s částečně zastíněným článkem [3]

3.10 Bypassové diody

Za účelem ochrany jednotlivých článků před tepelným zničením a značnému poklesu výkonu, jsou do solárních panelů integrovány bypassové (překlenovací) diody. Tyto diody odpojují články v momentu jejich zastínění a umožňují tím eliminovat pokles výkonu solárního panelu a proud, který by jinak procházel zastíněnými články.

Dnes se nejčastěji bypassové diody zapojují tak, aby překlenovaly 18-24 článků obr. 18. Pro dokonalou ochranu panelu a článků, musí být tyto diody použity pro každý článek zvlášť. Důvodem, proč se bypassové diody nezapojují za každým článkem, jsou především ekonomické, ale i fakt, že způsobují určitý ztrátový proud, který se projeví snížením výsledného proudu dodávaného solárními články. Nejčastěji se využívají dvě bypassové diody, které postačují pro panel o výkonu 200Wp obsahující 36-40 solárních článků. Tyto diody jsou většinou integrovány do rámu panelu nebo spojovací skříňky.

Využitím polovodičové technologie mohou být bypassové diody také integrovány přímo do solárních článků. Solární panely s takto integrovanými diodami vykazují menší ztráty vlivem nesouměrného ozáření, ale jejich cena je stále značně vysoká.

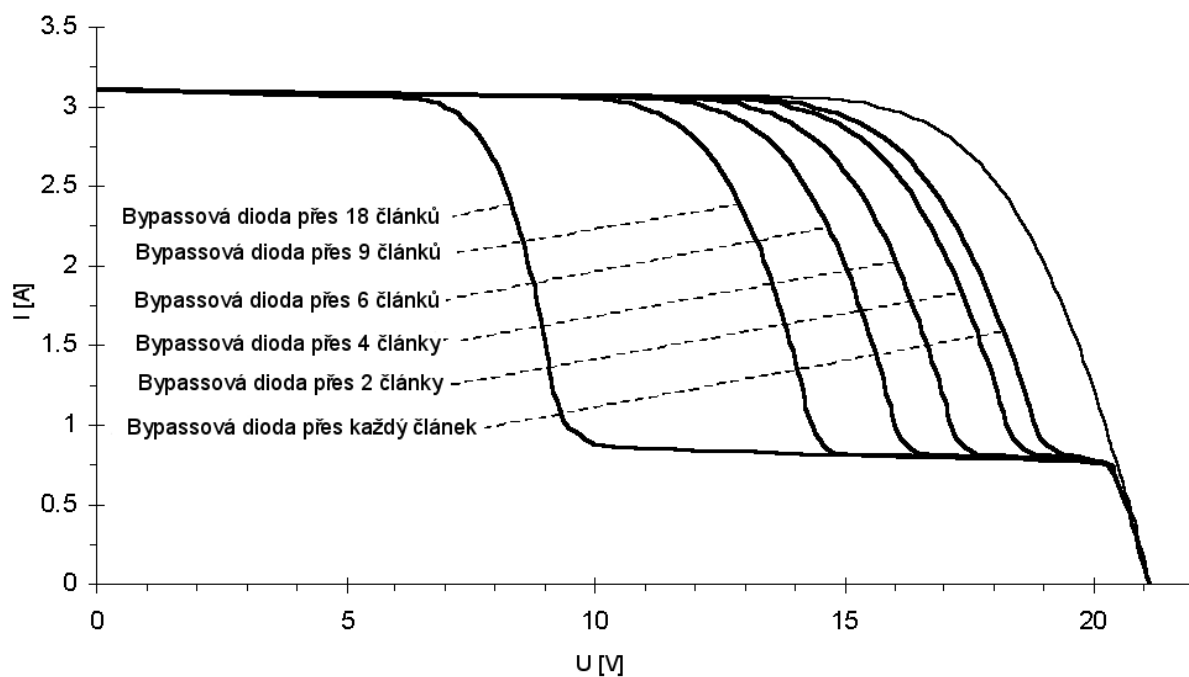


Obrázek 18: Způsob zapojení bypassové diody v solárním panelu [3]

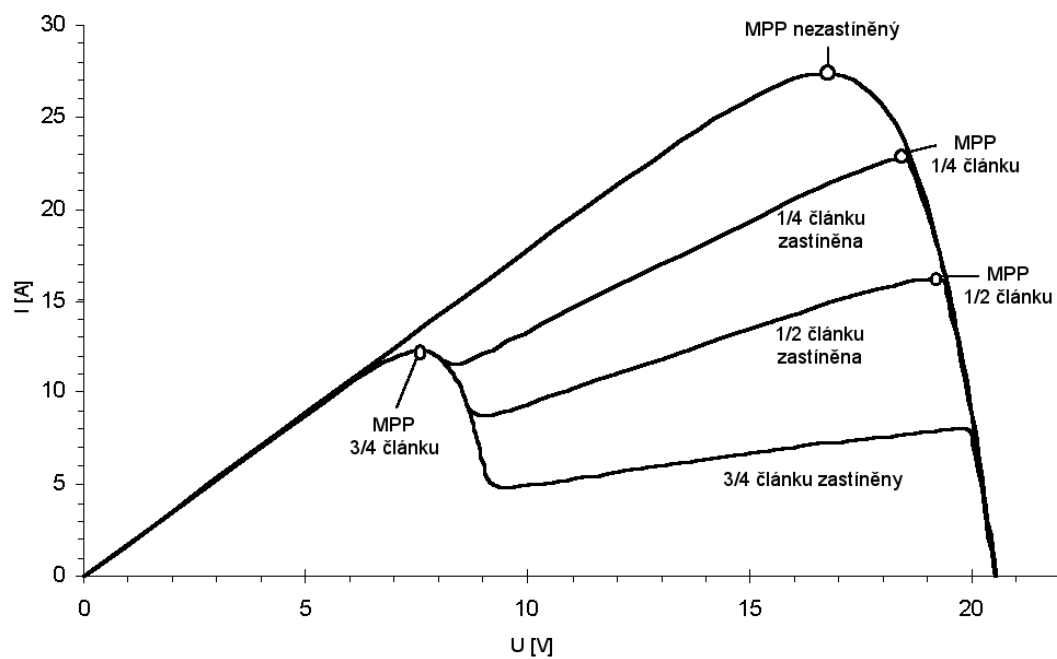
Bypassové diody přecházejí do propustného směru při napětí kolem $-0,6\text{V}$ v závislosti na typu diody. Toto záporné napětí se objeví, jakmile je napětí zastíněného solárního článku rovno součtu napětí nezastíněných solárních článků a napětí bypassové diody.

Obr. 19 ukazuje tvar volt-ampérové charakteristiky solárního panelu, který má zastíněn pouze jeden solární článek ze 75% a znázorňuje měnící se I - U charakteristiku pro použití bypassových diod přes různý počet solárních článků. Čím bypassová dioda překlenuje menší počet článků, tím se enormní pokles proudu posouvá k vyššímu napětí. Nejvyššího výkonu dosahuje solární panel s bypassovými diodami přes každý solární článek, kde se při zastínění odstaví jen konkrétní článek, nikoli celá série, kterou dioda přemostuje.

Výkonová charakteristika solárního panelu s různým stupněm zastínění článku je na obr. 20. Průběh výkonové charakteristiky je pro panel s 36ti články a dvěmi bypassovými diodami přes 18ti článků. Výkon panelu se vlivem velikosti zastínění článku výrazně mění. Jak je patrné, bod MPP se posouvá v závislosti na stupni zastínění po ose y a po ose x . S rostoucím zatížením výrazně klesá proud a do jisté míry i napětí. Panel se zastíněním jednoho článku z jedné čtvrtiny dosahuje přibližně 70% celkového výkonu.



Obrázek 19: I-U charakteristika solárního panelu s bypassovými diodami přes různý počet článků ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [3]

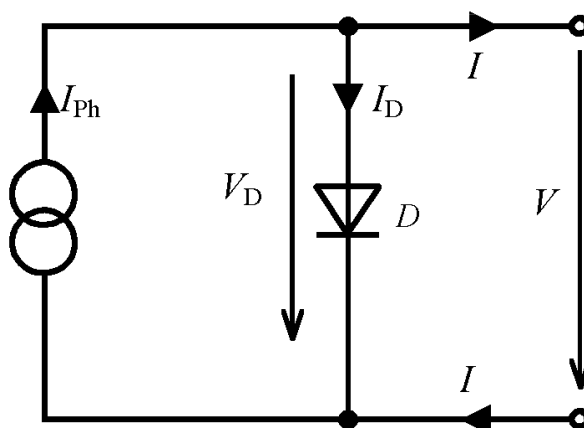


Obrázek 20: P-U charakteristika solárního panelu s různým stupněm zastínění jednoho solárního článku ($E = 574 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [3]

4 Ekvivalentní obvody

4.1 Jednoduchý ekvivalentní obvod [3]

Fotovoltaický článek je vlastně velkoplošná dioda. Skládá se z vrstev dopovaného polovodiče typu P a N, vytvářející oblast prostorového náboje. Z toho důvodu má solární článek chování jako běžná dioda, kterou lze popsat ekvivalentním obvodem.



Obrázek 21: Jednoduchý ekvivalentní obvod [3]

Rovnice proudu solárního článku závisí na napětí $U=U_D$, saturačním proudu I_S a diodovém faktoru m (rovnice 10),

$$I = -I_D = -I_S \left(\exp \left(\frac{U_D}{m U_T} \right) - 1 \right) \quad (10)$$

kde

I_S saturační proud

U_T tepelné napětí

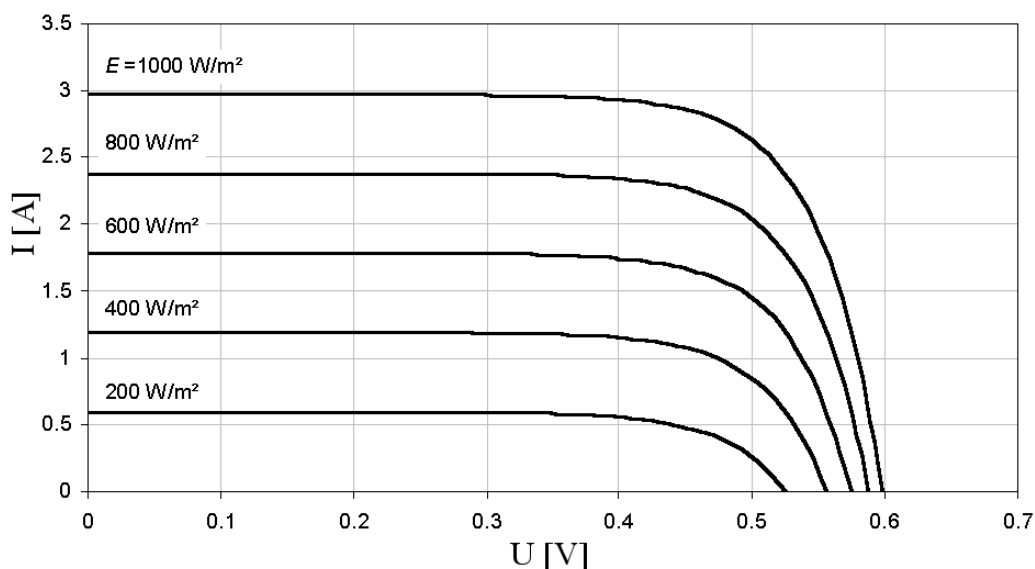
m diodový faktor

U_D napětí článku

Při teplotě 25°C je teplotní napětí $U_T = 25,7\text{mV}$ a saturační proud I_S je v rozmezí $10^{-10} - 10^{-5} \text{ A}$. Diodový faktor m má ideální hodnotu 1, nicméně jeho hodnota může být v rozmezí 1 až 5 pro lepší popis charakteristik solárního článku.

Proudový zdroj zapojený paralelně k diodě vytváří jednoduchý ekvivalentní obvod ozářeného článku. Proudový zdroj generuje fotoproud I_{ph} , který závisí na intenzitě záření E (obr. 22) a koeficientu c_0 :

$$I_{ph} = c_0 \cdot E \quad (11)$$



Obrázek 22: Vliv intenzity záření E na I-U charakteristiku solárního článku [3]

4.2 Jedno-diodový model [3]

Jedno-diodový model lze použít pro většinu aplikací. Rozdíl mezi vypočtenými a skutečně naměřenými hodnotami je v řádu několika málo procent. Nicméně právě tyto rozšířené modely umožňují popsat chování solárního článku s velkou přesností, zvláště v širokém pásmu pracovních podmínek. Nosiče náboje prodělávají pokles napětí na jejich cestě polovodičovým spojením na externí kontakty.

Sériový odpor R_s reálného článku je v řádu mili ohmů ($m\Omega$), paralelní odpor R_p je často větší jako 10Ω . Vliv těchto parametrů je vidět na obr. 12 a obr. 13.

Rovnice 12 rozšířeného jedno-diodového modelu je

$$0 = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_s}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} - I \quad (12)$$

kde

I_S saturační proud

U_T tepelné napětí

m diodový faktor

U napětí článku

I_{ph} fotoproud

I proud článku

R_S sériový odpor

R_P paralelní odpor

Tato rovnice se nedá jednoduše řešit jako rovnice 10 a je třeba použít Newtonovi metody. Ta spočívá v hledání kořene rovnice, při které je rovnice rovna nule.

Odpovídající proud I a napětí U jsou stanoveny pro napětí U_g a proud I_g . Jakékoli řešení bude pro funkci $f = (U, I)$ nulové a následující interakcí je vhodné nalézt toto řešení:

$$U_{i+1} = U_i - \frac{f(U_i, I_g)}{df\left(\frac{U_i, I_g}{dU}\right)} \quad (13)$$

Interakce implicitní rovnice je prováděna pro zjištění počáteční hodnoty U_0 nebo I_0 s daným proudem I_g nebo napětím U_g do té doby, než je rozdíl mezi dvěma kroky menší než předdefinovaný limit ε . Podmínky k ukončení interakce jsou: $|U_i - U_{i-1}| < \varepsilon$ nebo $|I_i - I_{i-1}| < \varepsilon$.

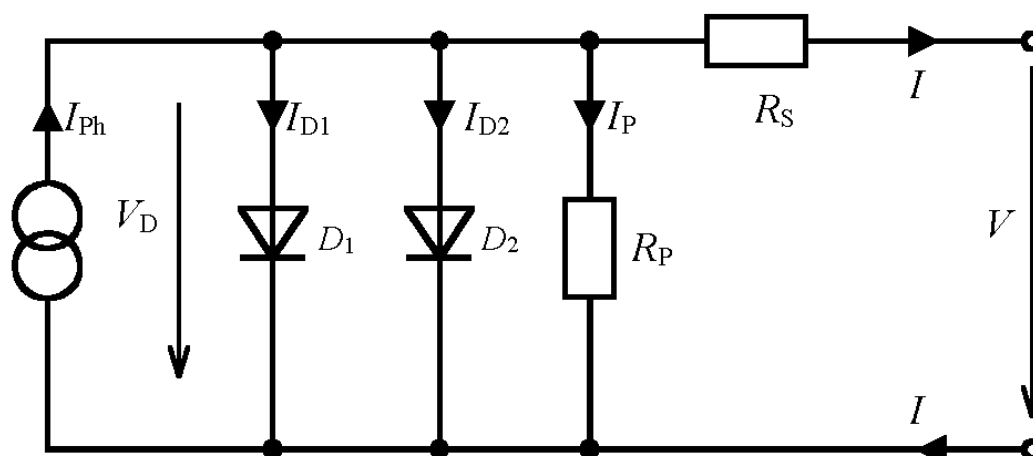
Newtonova metoda má tendenci rychle konvergovat, nicméně rychlost konvergence silně závisí na zvolené počáteční hodnotě U_0 nebo I_0 .

Interakce odhadovaného proudu I solárního článku pro dané napětí U_g je podle rovnice 14:

$$I_{i+1} = I_i - \frac{I_{ph} - I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U_g + I_i \cdot R_S}{m \cdot U_T}\right) - 1 \right) - \frac{U_g + I_i \cdot R_S}{R_P} - I_i}{-\frac{I_S \cdot R_S}{m \cdot U_T} \cdot \exp\left(\frac{U_g + I_i \cdot R_S}{m \cdot U_T}\right) - \frac{R_S}{R_P} - 1} \quad (14)$$

4.3 Dvou-diodový model [3]

Dvou-diodový model je vidět na obr. 23. Tento model poskytuje lépe chování solárního článku. Druhá dioda je spojena paralelně s první diodou. Obě tyto diody mají odlišný saturační proud a diodový faktor. Hodnota diodového faktoru je většinou $m_1=1$ a $m_2=2$.



Obrázek 23: Dvou-diodový model solárního článku [3]

Implicitní rovnice pro dvou-diodový model je:

$$0 = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_s}{m_1 \cdot U_T}\right) - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_s}{m_2 \cdot U_T}\right) - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} - I \quad (15)$$

kde

Unapětí na solárním článku

Iproud na solárním článku

I_{ph}foto odpor

I_{s1} saturační proud první diody

I_{s2} saturační proud druhé diody

R_ssériový odpor

R_p paralelní odpor

m_1diodový faktor první diody

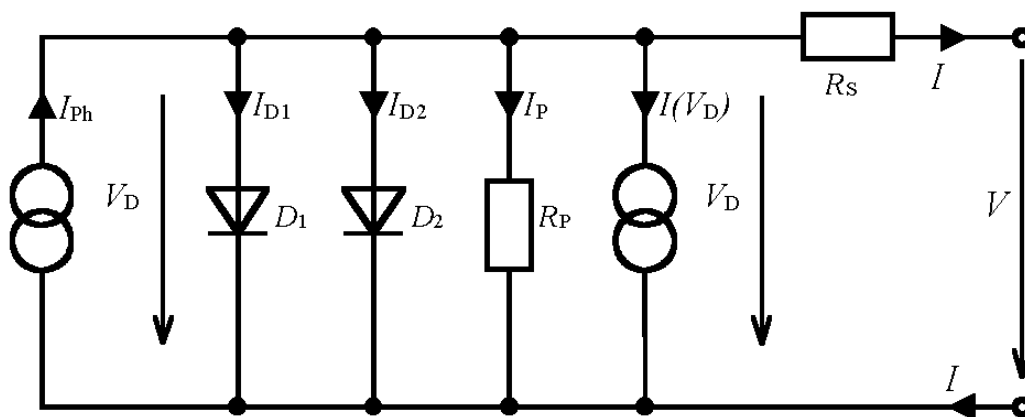
m_2diodový faktor druhé diody

U_Tteplotní napětí

U_{Br}průrazné napětí

4.4 Rozšířený dvou-diodový model [3]

K možnosti vytvoření celé volt-ampérové charakteristiky musí být rozšířený ekvivalentní obvod solárního článku rozšířen o popis průrazu při vysokém záporném napětí. Druhý proudový zdroj $I(U_D)$ v obr. 24 vyjadřuje průraz diody při vysokém záporném napětí.



Obrázek 24: Dvou-diodový model s rozšířeným členem [3]

Tento proudový zdroj generuje proud, který závisí na napětí diody U_D a popisuje chování solárního článku při záporném napětí. Rovnice 16 s rozšířeným členem je

$$0 = I_{ph} - I_{S1} \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_s}{m_1 \cdot U_T}\right) - 1 \right) - I_{S2} \cdot \left(\exp\left(\frac{U + I \cdot R_s}{m_2 \cdot U_T}\right) - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} - \underbrace{b \cdot (U + I \cdot R_s) \left(1 - \frac{U + I \cdot R_s}{U_{Br}} \right)^{-n}}_{\text{rozšířený člen}} \quad (16)$$

kde

U napětí na solárním článku

I	proud na solárním článku
I_{ph}	foto odpor
I_{S1}	saturační proud první diody
I_{S2}	saturační proud druhé diody
R_S	sériový odpor
R_P	paralelní odpor
m_1	diodový faktor první diody
m_2	diodový faktor druhé diody
U_T	teplotní napětí
U_{Br}	průrazné napětí
b	korekční konduktance
n	exponent pro lavinový průraz

5 Praktické měření I-U charakteristik solárního panelu

V této části bude popsáno měření volt-ampérové charakteristiky fotovoltaického panelu. To probíhalo pomocí PC a softwarového vybavení Agilent VEE Pro. Výstupní naměřená data byla ukládána do MS Excel, kde z nich byly vytvořeny grafy.

Proměřovaný fotovoltaický panel byl poskytnut fakultou, avšak z důvodu jeho starší výroby nebyl zjištěn výrobce ani žádné jiné výrobcem udávané parametry.

Měření volt-ampérových charakteristik bylo nejprve provedeno pro panel s bypassovými diodami. Volt-ampérová charakteristika se proměřovala pro plně ozářený a pro částečně zastíněný panel. Poté se provedlo stejné měření pro panel bez bypassových diod.

5.1 Měřicí pracoviště

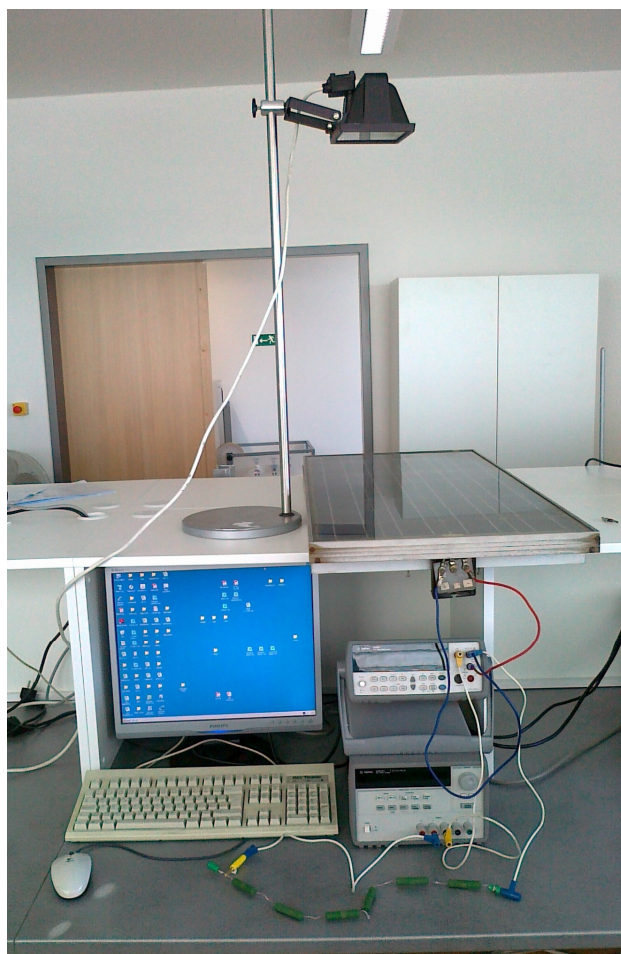
Pro měření volt-ampérových charakteristik solárního panelu bylo sestaveno měřicí pracoviště skládající se z PC s instalovaným prostředím VEE 8.0, halogenové výbojky 500W, zdroje napětí, zátěžových odporů 100/300Ω a digitálního multimetru (tabulka 1).

Typ
PC + software
výbojka 500W
PV panel -36 článků, 2 bypassové diody
zdroj Agilent E3632A
digitální multimetr Agilent 34405A
6x zátěžovací odpory UR006 56RJ

Tabulka 1: Použitá zařízení

Solární panel byl umístěn v laboratoři do horizontální polohy. Nad ním, pomocí stojanu, byl upevněn zdroj světla (500W žárovka) ve výšce 80cm. Obr. 25 znázorňuje měřicí pracoviště. Digitální multimetr byl s počítačem propojen pomocí USB kabelu a zdroj napětí pomocí GBIP kabelu. Celkové schéma zapojení měřicího pracoviště je vidět na obr. 26.

Při měření je použito odporu 100Ω a 300Ω. Tento odpor je zapojen se zdrojem do série a je použit k nastavení vyššího napětí. Pomocí krokodýlků je během měření jeho hodnota měněna ze 100Ω na 300Ω a k jeho změně byla v programu nastavena 10s pauza.

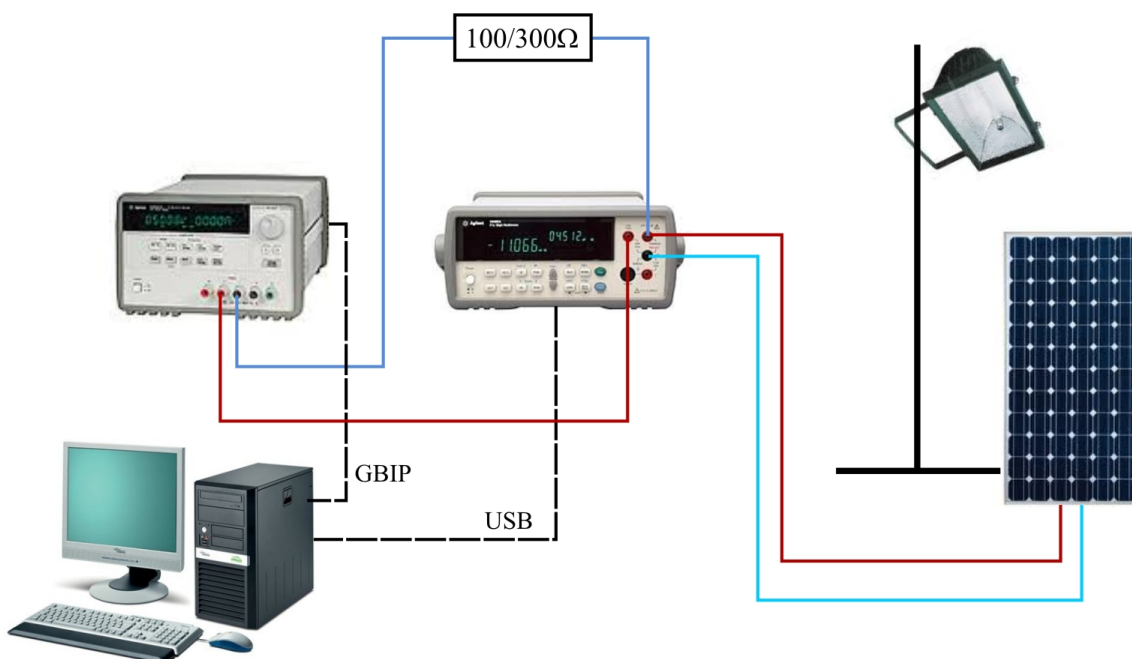


Obrázek 25: Měřicí pracoviště

Napětí na zdroji je nastaveno k proměření celé volt-ampérové charakteristiky solárního panelu tzn. od 0 do U_{OC} . Jelikož zdroj neumožňuje zadat záporné napětí, je během měření provedena změna polaroty prohozením kolíků na zdroji. K tomu účelu byla opět přidána do programu pauza 10s.

Celé měření probíhalo v několika krocích:

1. Nejprve je na zdroji pomocí programu nastaveno napětí 26V, konečná hodnota 0V a měřicí krok je -1V. Zátěžový odpor je nastaven na 100Ω .
2. Poté, během 10s prodlevy, se nastavuje odpor na 300Ω . Na zdroji je opět nastavena počáteční hodnota 26V, konečná hodnota 0V a měřicí krok je -2V.
3. Posledním krokem je změna polaroty zdroje přepólováním konektorů. Napětí na zdroji je nastaveno na 0V, maximální hodnota 20V a krok je 2V.



Obrázek 26: Schéma zapojení měřicího pracoviště

Při měření se data přenášejí přes USB kabel do počítače a zapisují se do MS Excel. Zaznamenávané hodnoty jsou: odebíraný proud I fotovoltaiického panelu a napětí U na tomto panelu. Poté je z těchto hodnot v Excelu vytvořen graf volt-ampérové charakteristiky měřeného solárního panelu.

5.2 Solární panel

Proměřovaný solární panel je složen z 36ti monokrystalických článků propojených do série. Panel obsahuje dvě bypassové diody, kde každá překlenuje řetězec 18ti článků. Proměřovaný solární panel je vidět na obr. 27. Rozměry jednotlivých článků jsou $0,1 \times 0,1 \text{ m}$. Plocha jednoho článku je $10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ a celková plocha panelu s 36ti články je $0,36 \text{ m}^2$. Panel je v hliníkovém rámu o rozměrech $0,455 \times 1 \text{ m}$ a na zadní straně je plastová propojovací krabice s diodami.

Ze štítku na panelu se nepodařilo zjistit výrobce ani udávané hodnoty. Tento štítek byl natolik poničen, že přečtení nebylo možné.

Osvit panelu byl proveden zářivkou 500W ze vzdálenosti 0,8m. Pyranometrem naměřená intenzita dopadajícího světla byla 140 W/m^2 .



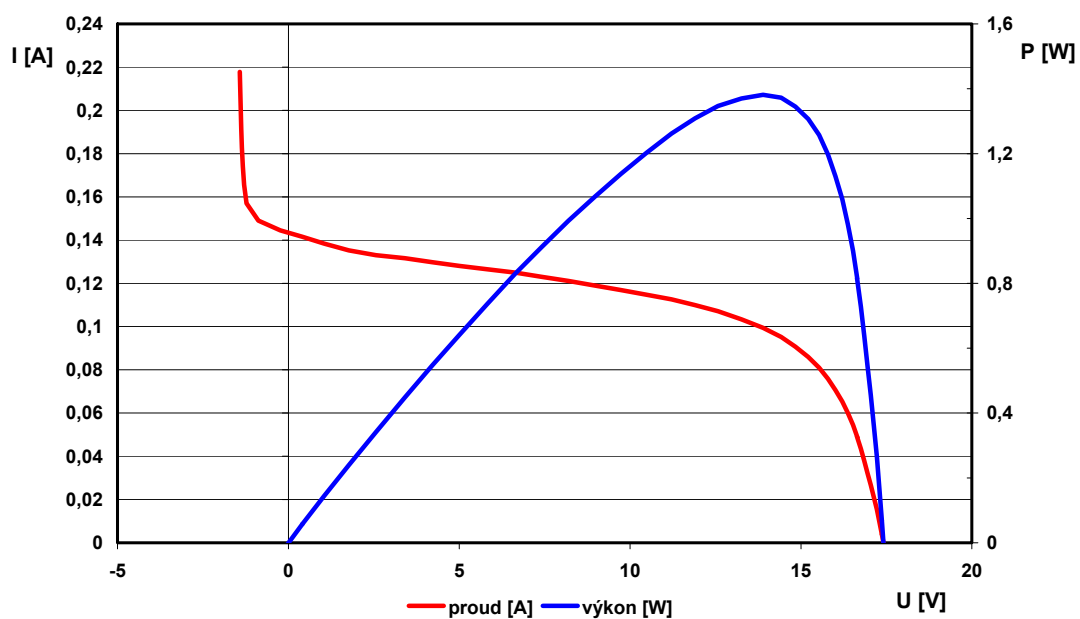
Obrázek 27: Fotovoltaický panel

5.3 Měření *I-U* a *P-U* charakteristik solárního panelu

Měření volt-ampérových charakteristik panelu probíhalo za stejných pracovních podmínek. Nejprve se měřila charakteristika plně ozářeného solárního panelu a jeho jednotlivých řetězců. Poté byla změřena charakteristika jednoho řetězce solárního panelu se zastíněnými šesti články a charakteristika celého panelu se stejným zastíněním. Stejný postup probíhal i pro proměření volt-ampérové charakteristiky solárního panelu bez bypassových diod.

5.3.1 *I-U* a *P-U* charakteristika osvětleného solárního panelu

Na obr. 28 je znázorněna naměřená *I-U* a *P-U* charakteristika plně ozářeného solárního panelu (osvětlení 500W, intenzita dopadajícího světla na povrchu panelu $E=140 \text{ W/m}^2$).



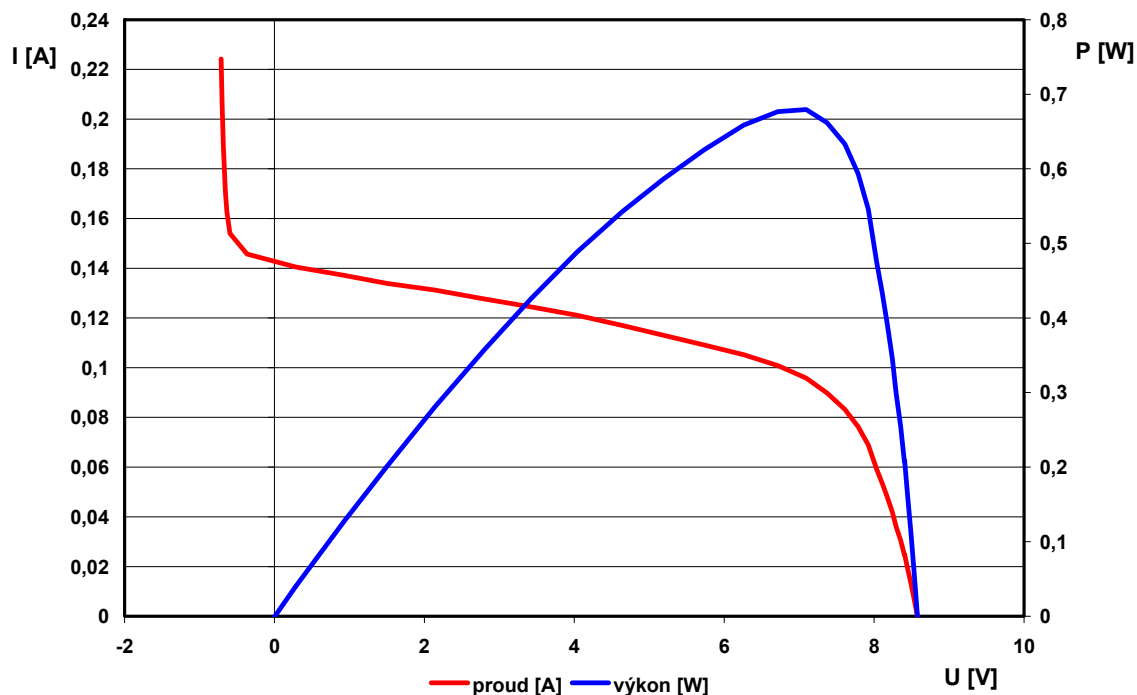
Obrázek 28: I-U a P-U charakteristika nezastíněného solárního panelu

Z naměřených hodnot byly určeny základní hodnoty solárního panelu, které jsou zaneseny do tabulky 2. Z grafu na obr. 28 je vidět, že bypassové diody se otevírají při napětí okolo -1,2V respektive jedna bypassová dioda při -0,6V.

U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	P_{MPP} [W]	FF [-]	η [%]
17,4	0,143	13,894	0,099	1,381	0,555	2,740

Tabulka 2: Hodnoty nezastíněného solárního panelu

5.3.2 I-U a P-U charakteristika řetězce 18ti solárních článků



Obrázek 29: I-U a P-U charakteristika 18ti solárních článků

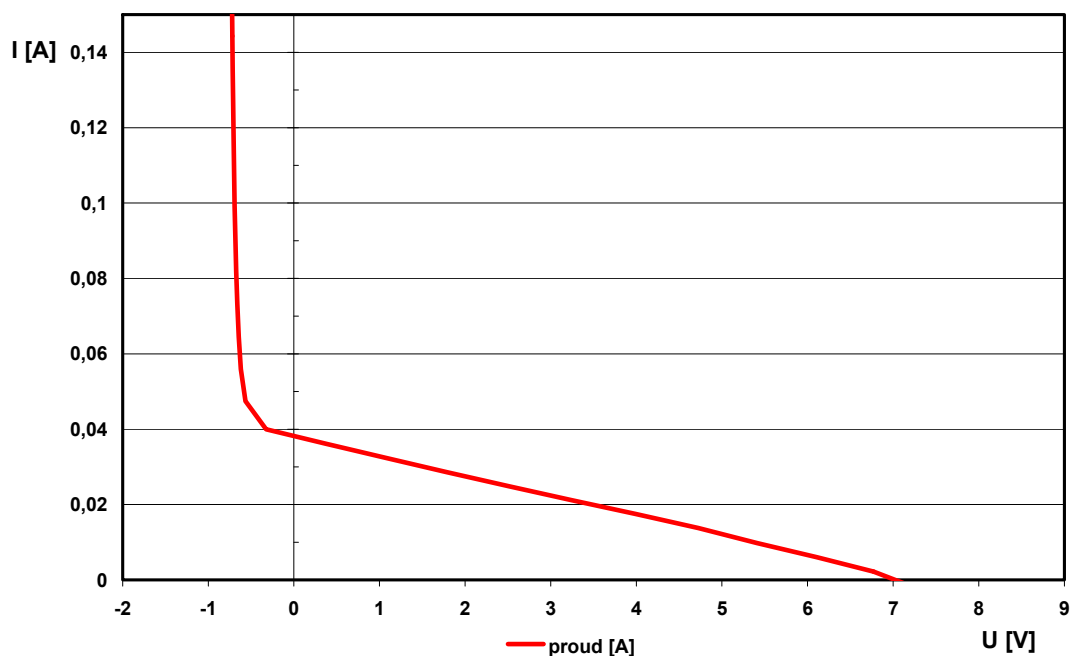
Změřená I-U a P-U charakteristika nezastíněného řetězce 18ti solárních článků fotovoltaického panelu je na obr. 29. Naměřené hodnoty řetězce jsou vyneseny do tabulky 3.

Porovnáním hodnot z grafů na obr. 28 a 29 si lze všimnout, že proud řetězce 18ti solárních článků a celého fotovoltaického panelu jsou stejné a mění se jen celkové napětí. To je dáno sériovým propojením solárních článků. Celkový výkon řetězce je $P_{MPP} = 0,679 \text{ W}$ a je přibližně poloviční jako výkon celého fotovoltaického panelu.

U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	P_{MPP} [W]	FF [-]	η [%]
8,58	0,143	7,092	0,096	0,679	0,553	2,694

Tabulka 3: Hodnoty nezastíněného řetězce 18ti solárních článků

5.3.3 I-U charakteristika zastíněného řetězce



Obrázek 30: I-U charakteristika zastíněného řetězce 18ti solárních článků

Na obr. 30 je vynesena volt-ampérová charakteristika zastíněného řetězce 18ti solárních článků fotovoltaického panelu. Zastínění je provedeno pro 6 solárních článků pomocí světla nepropustné vrstvy. Závěrné napětí diody je z grafu odečteno a jeho hodnota je okolo -0,6V.

5.3.4 I-U a P-U charakteristika zastíněného solárního panelu

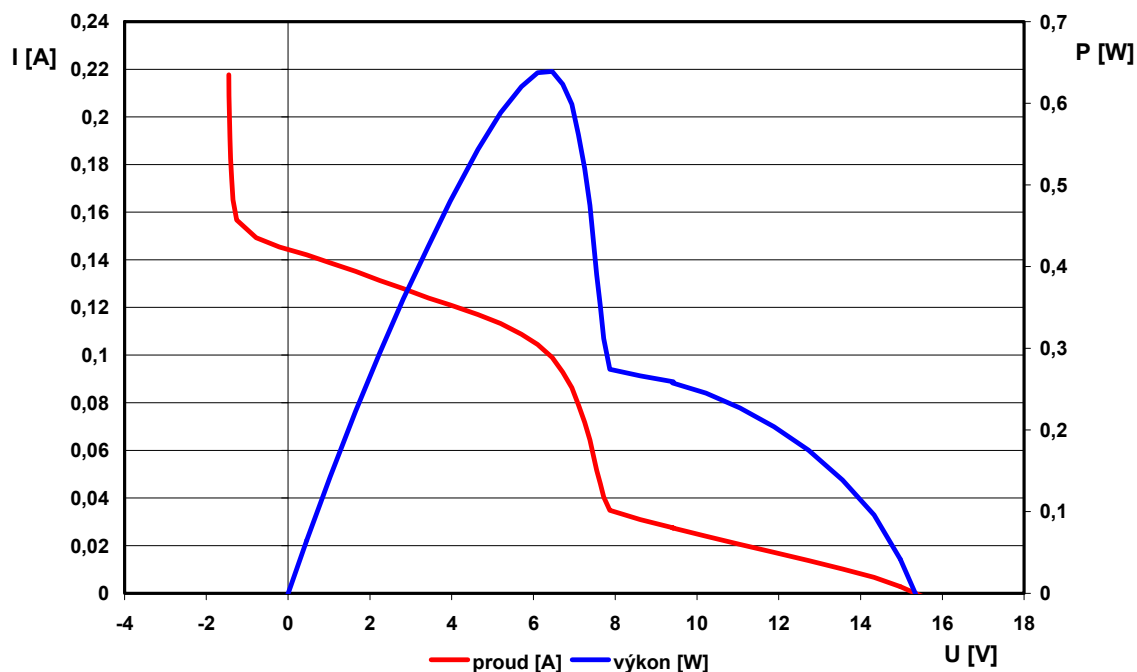
Celková I-U a P-U charakteristika fotovoltaického panelu se zastíněním 6ti solárních článků je na obr. 31. Z průběhu P-U charakteristiky vidíme, že výkonová křivka má dvě maxima. První lokální maximum s výkonem 0,64W je při napětí 6,45V. Druhé maximum je přibližně 0,28W při napětí 8V.

I-U charakteristika panelu je složena ze dvou průběhů. Z volt-ampérové křivky nezastíněného a částečně zastíněného řetězce.

U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	P_{MPP} [W]	FF [-]	η [%]
15	0,143	6,456	0,099	0,639	0,298	1,268

Tabulka 4: Hodnoty zastíněného solárního panelu

Z grafu na obr. 31 je zřetelně vidět vliv bypassové diody. Ta přemost'uje zastíněný řetězec, který by jinak odebíral energii. Jednotlivé hodnoty jsou zaneseny do tabulky 4.

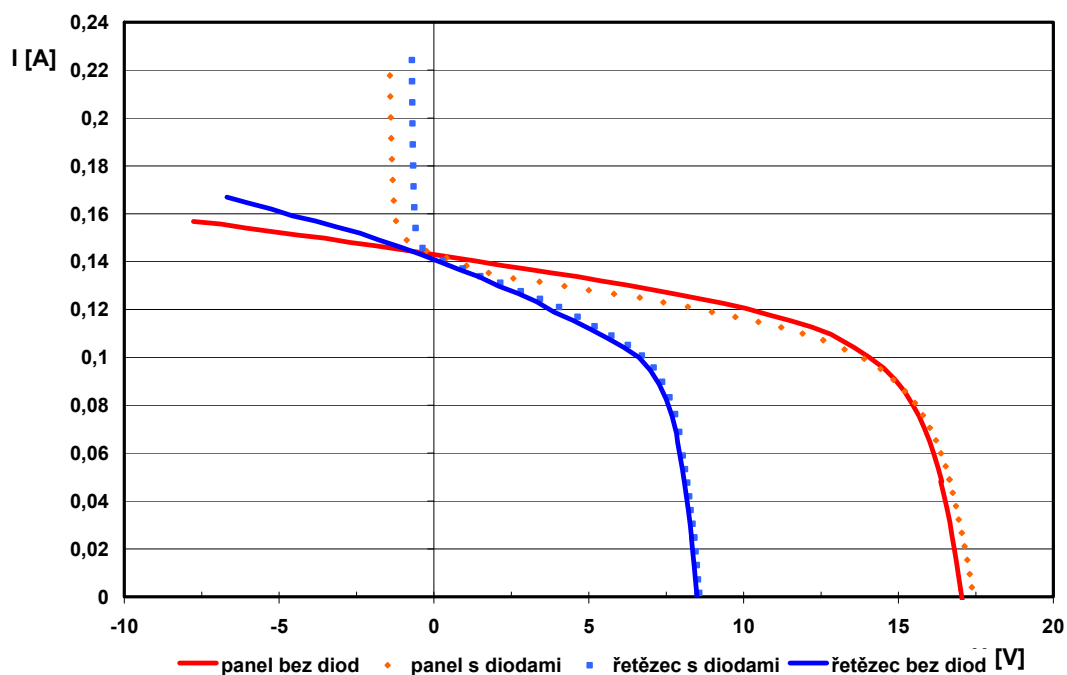


Obrázek 31: I-U a P-U charakteristika zastíněného solárního panelu s bypassovými diodami

5.3.5 I-U a P-U charakteristika solárního panelu bez bypassových diod

Na obr. 32 jsou porovnány volt-ampérové charakteristiky fotovoltaického panelu a řetězce 18ti solárních článků s bypassovými diodami a bez nich.

Mírný rozdíl napětí naprázdno U_{OC} mezi fotovoltaickým panelem s bypassovými diodami a při jejich odpojení může být způsobeno rozdílnou teplotou fotovoltaického panelu. Např. vlivem nedostatečného vychlazení panelu od předchozích měření a tím ke zkreslení měření.



Obrázek 32: Porovnání I-U charakteristik solárního panelu a řetězce 18ti článků s bypassevými diodami a bez nich

5.3.6 Porovnání I-U a P-U charakteristik solárního panelu

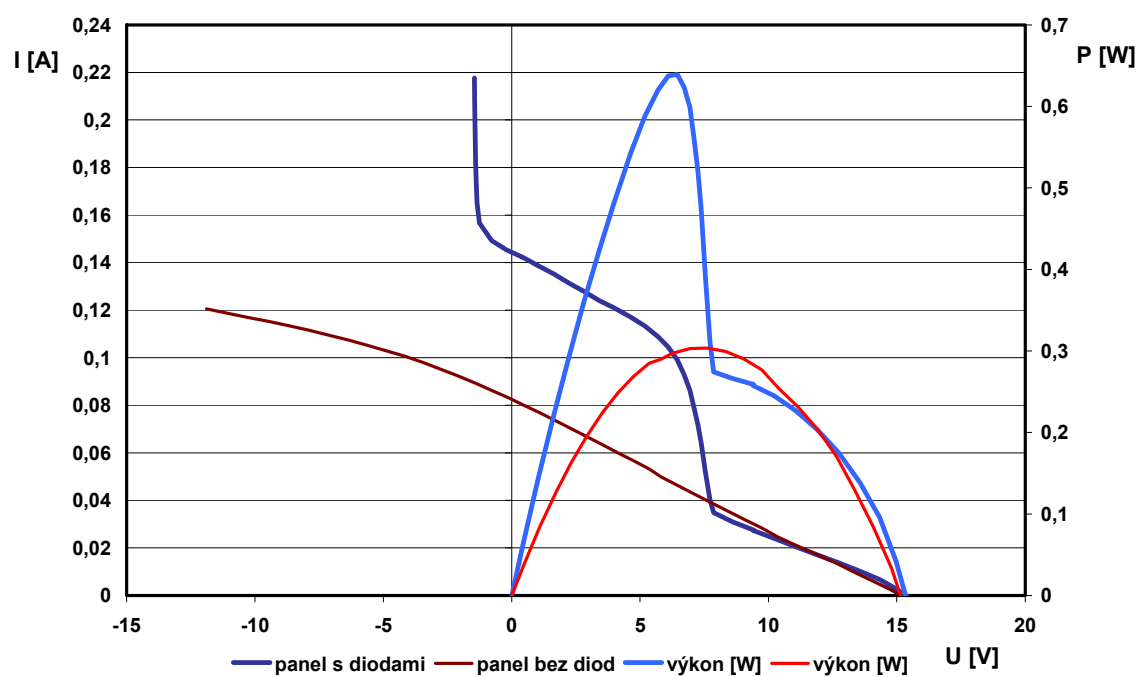
Na obr. 33 je porovnání I-U a P-U charakteristik zastíněného solárního panelu s bypassevými diodami a bez nich. Bez použití bypassevých diod je vidět, že pokles výkonu je dramatický a volt-ampérová charakteristika má téměř lineární pokles proudu na napětí.

Použití bypassevých diod má značný vliv na celkový výkon panelu. Pokud by bylo použito např. překlenutí přes každé dva články solárního panelu, celkový výkon by byl ještě vyšší.

Tabulka 5 uvádí souhrn hodnot U_{OC} , I_{SC} , U_{MPP} , I_{MPP} , P_{MPP} měřeného solárního panelu s použitím bypassevých diod a bez nich.

	U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	P_{MPP} [W]
s diodami	15	0,143	6,456	0,099	0,639
bez diod	15	0,081	7,631	0,040	0,304

Tabulka 5: Naměřené hodnoty solárního panelu

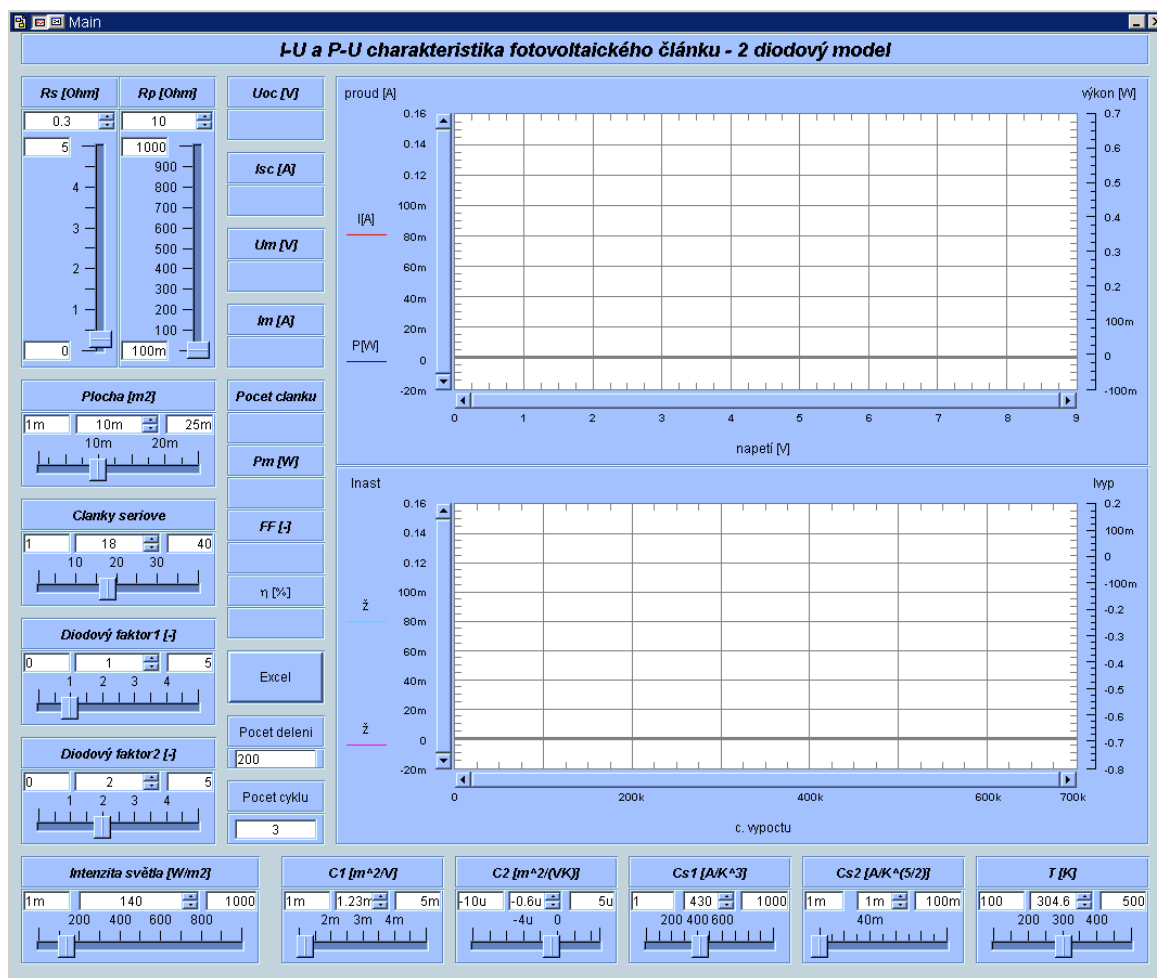


Obrázek 33: Porovnání I-U a P-U charakteristik zastíněného solárního panelu s bypasseovými diodami a bez nich

6 Simulace I-U charakteristik

K simulaci I-U a P-U charakteristik fotovoltaického panelu je využito programového prostředí Agilent VEE Pro 8.0. Tento software je vyvinut společností Agilent a jeho výhodou je uživatelsky přívětivé prostředí. Software VEE Pro 8.0 využívá vlastní programovací jazyk. Jedná se o programovací jazyk vysoké úrovně s použitím grafického zobrazení, které je podobné vývojovým diagramům.

Simulace vlivu bypassových diod na průběhy I-U a P-U charakteristik zastíněného a nezastíněného fotovoltaického panelu probíhá v prostředí VEE Pro 8.0. Simulace se provádí pomocí několika programů a umožňuje si ověřit vlivy jednotlivých parametrů panelu, které byly popsány v kapitole 3.7.



Obrázek 34: Grafické prostředí programu

Grafické rozhraní programu je vidět na obr. 34. Parametry se nastavují v jednotlivých oknech a k zadávání hodnot se používají posuvné jezdce. Během simulace se průběžná data automaticky zapisují do programu Microsoft Excel, kde posléze dochází k dodatečnému vyhodnocení.

6.1 *Princip simulace*

K simulaci volt-ampérových charakteristik se při výpočtu využívá intervalové metody. Ta spočívá ve výpočtu proudu solárního panelu, který je v rozmezí 0 do I_{ph} . Tento proud je rozdělen na definovaný počet intervalů a poté dosazován do rovnice 15. Při výpočtu je hledán nejmenší možný rozdíl dosazené a vypočtené hodnoty proudu. Po nalezení hodnoty proudu s nejmenším rozdílem se pro zpřesnění výsledné hodnoty provádí opět rozdělení do intervalů hodnot, které je provedeno mezi hodnotou s nejmenším rozdílem plus hodnota velikosti jednoho dílku intervalu a mínus hodnota velikosti jednoho dílku intervalu ($X \pm i$, kde X je nalezená hodnota s nejmenším rozdílem a i je velikost intervalu předchozích výpočtů). To se opakuje podle nadefinovaného počtu opakování k nalezení nejmenšího rozdílu a tedy i nej přesnější hodnoty proudu. Mnou zadaný počet intervalů byl zvolen s ohledem na kompromis mezi přesností výpočtu a dobou výpočtu. Zadanou hodnotu počtu intervalů jsem zvolil 100 ve 3 opakováních, tudíž pro každé napětí bylo provedeno 300 výpočtů proudu. To bylo zjištěno provedením experimentálních simulací s různým počtem intervalů a opakování.

6.2 *Vliv parametrů*

Při simulaci je výpočet prováděn v reálném čase a změnou parametrů lze ihned vidět jejich vliv na volt-ampérovou charakteristiku.

Nastavitelné parametry a jejich zjištěné vlivy jsou:

R_s [Ω] -sériový odpor. Se zvyšujícím se sériovým odporem dochází ke zmenšení úhlu náklonu volt-ampérové křivky mezi bodem M_{PP} a U_{OC} . Dále dochází k malému poklesu napětí naprázdno U_{OC} a proudu nakrátko I_{SC} . Celkový výkon solárního panelu se snižuje a Fill Factor se zhoršuje.

R_p [Ω] -paralelní odpor. Se snižujícím se paralelním odporem dochází ke zmenšení úhlu náklonu volt-ampérové křivky mezi bodem M_{PP} a I_{SC} . Dále pak k nepatrnému

zmenšení napětí naprázdno U_{OC} a proud nakrátko I_{SC} . Celkový výkon solárního panelu se zmenšuje a Fill Factor se zhoršuje.

Plocha solárních článků [m^2] -s větší plochou solárních článků roste celkový výkon panelu.

Počet solárních článků v sérii -s rostoucím počtem se zvětšuje celkové napětí solárního panelu.

Diodový faktor m_1 a m_2 -těmito parametry je lépe popisováno chování solárního článku. Jejich ideální hodnota je $m_1=1$ a $m_2=2$.

Intenzita světelného záření [W/m^2] -s rostoucí intenzitou záření roste celkový výkon panelu.

T [K]- s rostoucí teplotou solárních článků se snižuje napětí a mírně klesá proud fotovoltaického panelu. Celkový výkon panelu klesá.

c_1 [m^2/V], c_2 [$m^2/(V.K)$], c_{s1} [A/K^3], c_{s2} [$m^2.K^{-5/2}$] – s jejich hodnotou se mění tvar celé I-U charakteristiky solárního panelu.

6.3 *Postup simulace*

Simulace charakteristik byla provedena pro solární panel popsáný v kapitole 5.2. Solární panel měl 36 článků a 2 bypassové diody. V panelu byly všechny články propojeny v sérii a každá dioda přemostovala řetězec 18ti solárních článků.

Simulace byla provedena pro solární panel:

a) s bypassovými diodami

1. pro solární panel bez zastínění
2. pro řetězec 18ti solárních článků bez zastínění
3. pro solární panel, v kterém je zastíněno 6 solárních článků v jednom řetězci

b) bez bypassových diod

1. pro solární panel bez zastínění
2. pro řetězec 18ti solárních článků bez zastínění
3. pro solární panel, v kterém je zastíněno 6 solárních článků v jednom řetězci

Při simulaci I-U a P-U charakteristik zastíněného fotovoltaického panelu s bypassovými diodami bylo postupováno v těchto krocích:

1. Solar300- simulace 12ti plně ozářených solárních článků. Výsledné hodnoty uloženy do souboru aaa.txt.
2. Solar400- simulace 6ti zastíněných solárních článků s intenzitou 1 W/m^2 . Výsledné hodnoty uloženy do souboru bbb.txt.
3. Solar6- Sečtení výstupních dat z programu Solar300 a Solar400. Výsledné hodnoty uloženy do souboru ccc.txt.
4. Solar300- simulace 18ti plně ozářených solárních článků. Výsledné hodnoty uloženy do souboru aaa.txt.
5. Solar7- sečtení výstupních dat z programu Solar300 a Solar6. Hodnoty jsou uloženy do souboru ddd.txt.

6.4 Hledání charakteristických parametrů

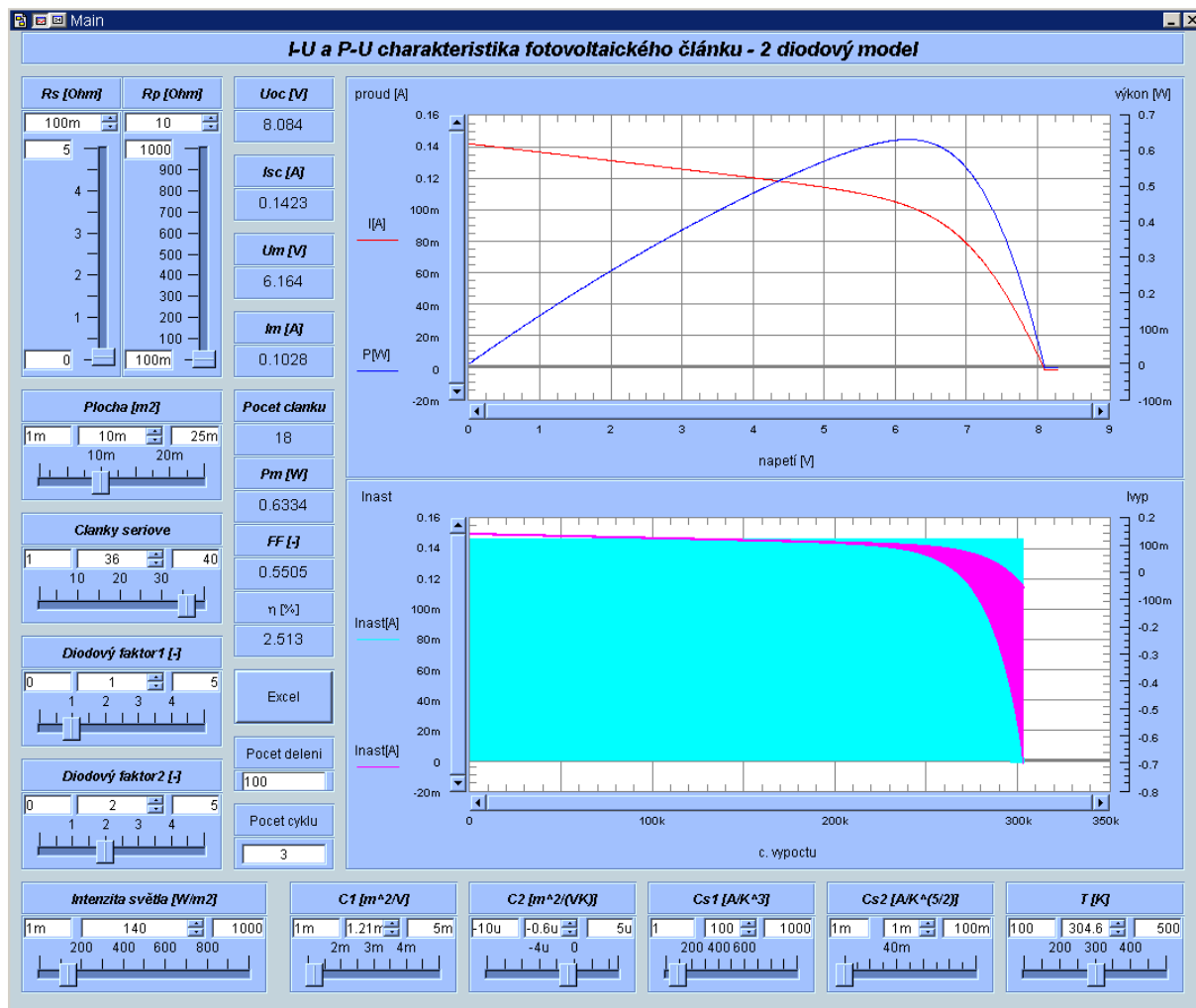
K nastavení simulačního programu bylo potřeba zadat vhodné konstanty a parametry tak, aby bylo možno nasimulovat volt-ampérovou charakteristiku solárního panelu co nejpřesněji s reálným měřením. U měřeného solárního panelu byly známy hodnoty jako plocha jednotlivých článků, intenzita osvětlení, teplota článků, průrazné napětí panelu. Díky těmto parametrům by bylo možné nasimulovat volt-ampérovou charakteristiku solárního panelu, která by však neodpovídala reálnému měření. Proto bylo potřeba nastavit další parametry jako sériový a paralelní odpor, konstanty c_1 , c_2 , c_{S1} , c_{S2} . Diodové faktory m_1 a m_2 byly brány jako ideální. Dále konstanty vodivost b , koeficient lavinového průrazu n a průrazné napětí V_{Br} byly stanoveny jako neměnné.

Pokud dojde k správnému nastavení hodnot R_S , R_P , c_1 , c_2 , c_{S1} , c_{S2} , výsledná simulace je shodná s reálně naměřenými I-U charakteristikami.

6.5 Simulace nezastíněného panelu

K simulování volt-ampérových charakteristik nezastíněného solárního panelu bylo využito programu Solar300. Nejprve byly nastaveny parametry pro 36 plně ozářených

solárních článků. Nastavení a výstupní hodnoty simulace jsou na obr. 35. V tabulce 6 jsou přehledně zaneseny hodnoty jednotlivých parametrů a výstupní volt-ampérová charakteristika je vidět na obr. 36.



Obrázek 35: Solar300- Simulace I-U a U-P charakteristiky nezastíněného solárního panelu

Poté byla provedena simulace 18ti solárních článků. Nastavené hodnoty byly opět zaneseny do tabulky 6 a výsledný graf je vidět na obr. 37. Z grafu je patrné, že došlo k snížení napětí naprázdno U_{oc} na 8,6V.

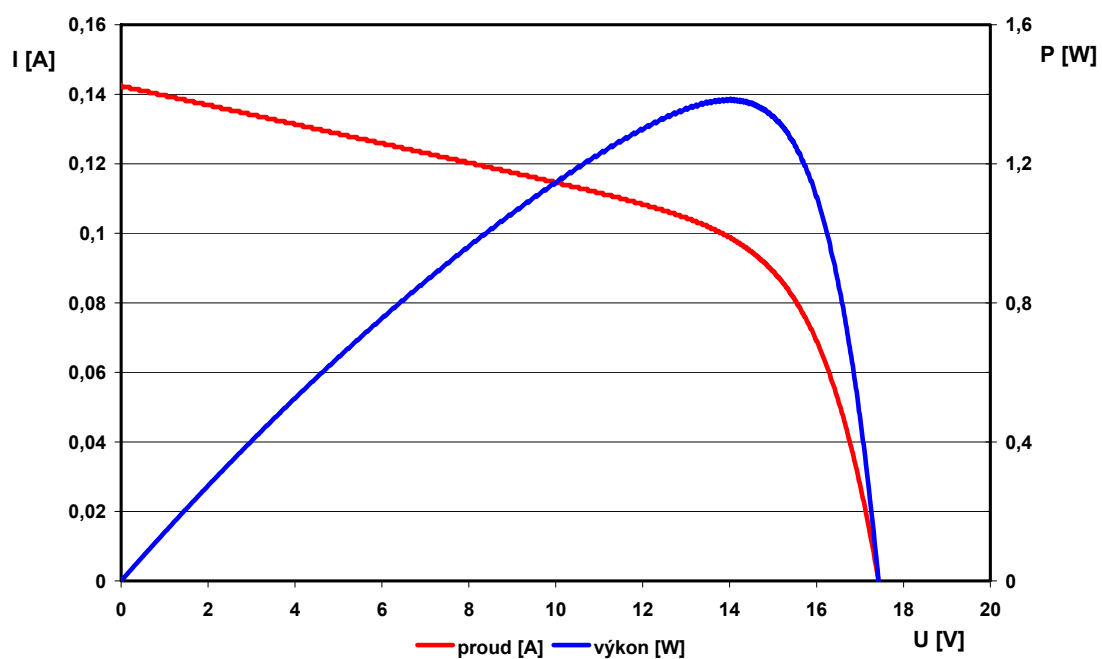
Počet článků	36	18	
Nastavené parametry	Velikost	Velikost	Jednotka
R_S	100m	100m	Ω
R_P	10	10	Ω
Plocha	10m	10m	m^2
Článků v sérii	36	18	-
Diodový faktor m_1	1	1	-
Diodový faktor m_2	2	2	-
Intenzita světla	140	140	W/m^2
C_1	1,21	1,21	m^2/V
C_2	-0,6u	-0,6u	m^2/VK
CS_1	100	130	A/K^3
CS_2	1m	1m	$A/K^{(5/2)}$
T	304,6	304,6	K

Tabulka 6: Nastavené parametry programu Solar300

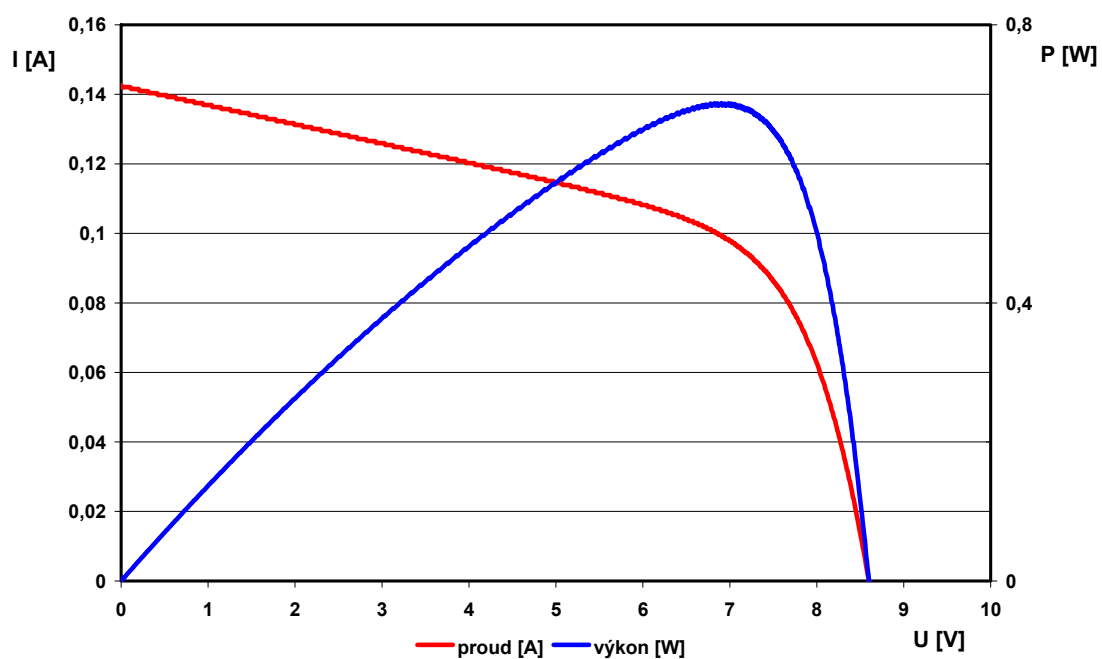
Simulovaný fotovoltaický panel s 36ti solárními články má maximální výstupní výkon 1,39W. Jeho napětí naprázdno je 17,4V a proud nakrátko 143mA. U řetězce 18ti solárních článků je vidět, že výstupní výkon je přibližně o polovinu menší. Výstupní hodnoty simulace fotovoltaického panelu a 18ti solárních článků jsou zaneseny do tabulky 7.

Počet článků	36	18	
Hodnoty	Velikost	Velikost	Jednotka
U_{OC}	17,424	8,600	V
I_{SC}	0,143	0,143	A
U_{MPP}	14,022	6,905	V
I_{MPP}	0,099	0,100	A
P_{MPP}	1,387	0,687	W
FF	0,558	0,560	-
η	2,753	2,727	%

Tabulka 7: Výstupní hodnoty simulace 36ti a 18ti solárních článků



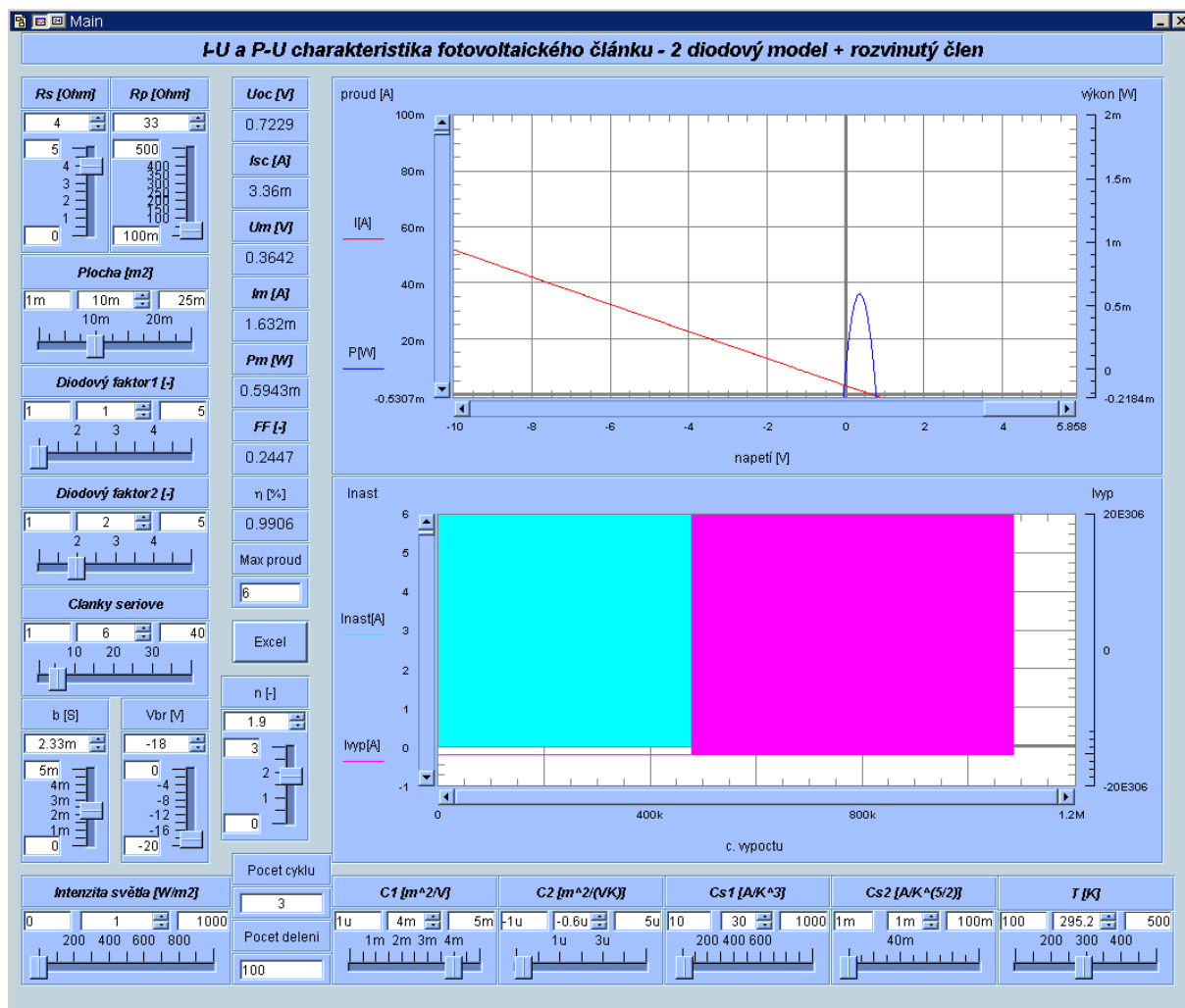
Obrázek 36: I-U a P-U charakteristiky nezastíněného solárního panelu



Obrázek 37: I-U a P-U charakteristiky nezastíněného řetězce 18ti solárních článků

6.6 Simulace zastíněných solárních článků

Simulace I-U a P-U charakteristik zastíněných solárních článků byla provedena v programu Solar400. Grafické prostředí je vidět na obr. 38. Intenzita světla byla nastavena na $E=1\text{W/m}^2$, což představuje částečné zastínění solárních článků. Výstupní hodnoty simulace jsou vyneseny do tabulky 8.

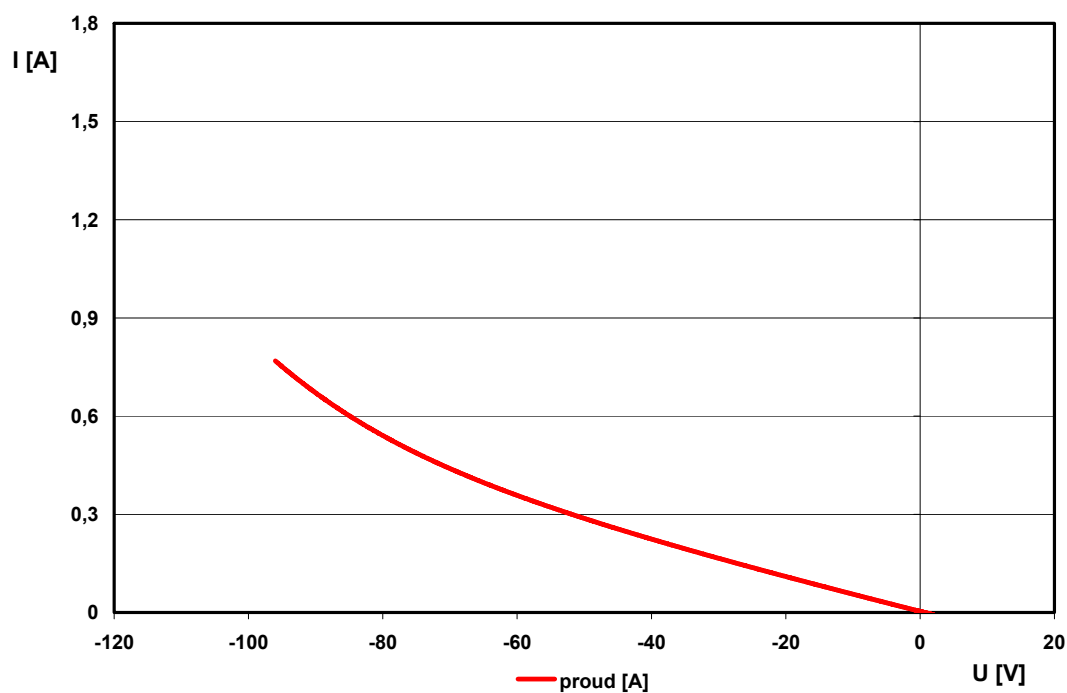


Obrázek 38: Solar400-Simulace I-U a I-P charakteristik zastíněných solárních článků

Nastavení velikosti intenzity osvětlení na 1W/m^2 bylo zvoleno z důvodů pronikání světla při okrajích stínící vrstvy zastíněných solárních článků.

Počet článků	6	
Hodnoty	Velikost	Jednotka
U_{OC}	0,64	V
I_{SC}	3,264m	A
U_{MPP}	0,364	V
I_{MPP}	1,536m	A
P_{MPP}	0,559m	W
FF	0,268	-
η	0,932	%

Tabulka 8: Naměřené hodnoty šesti zastíněných solárních článků

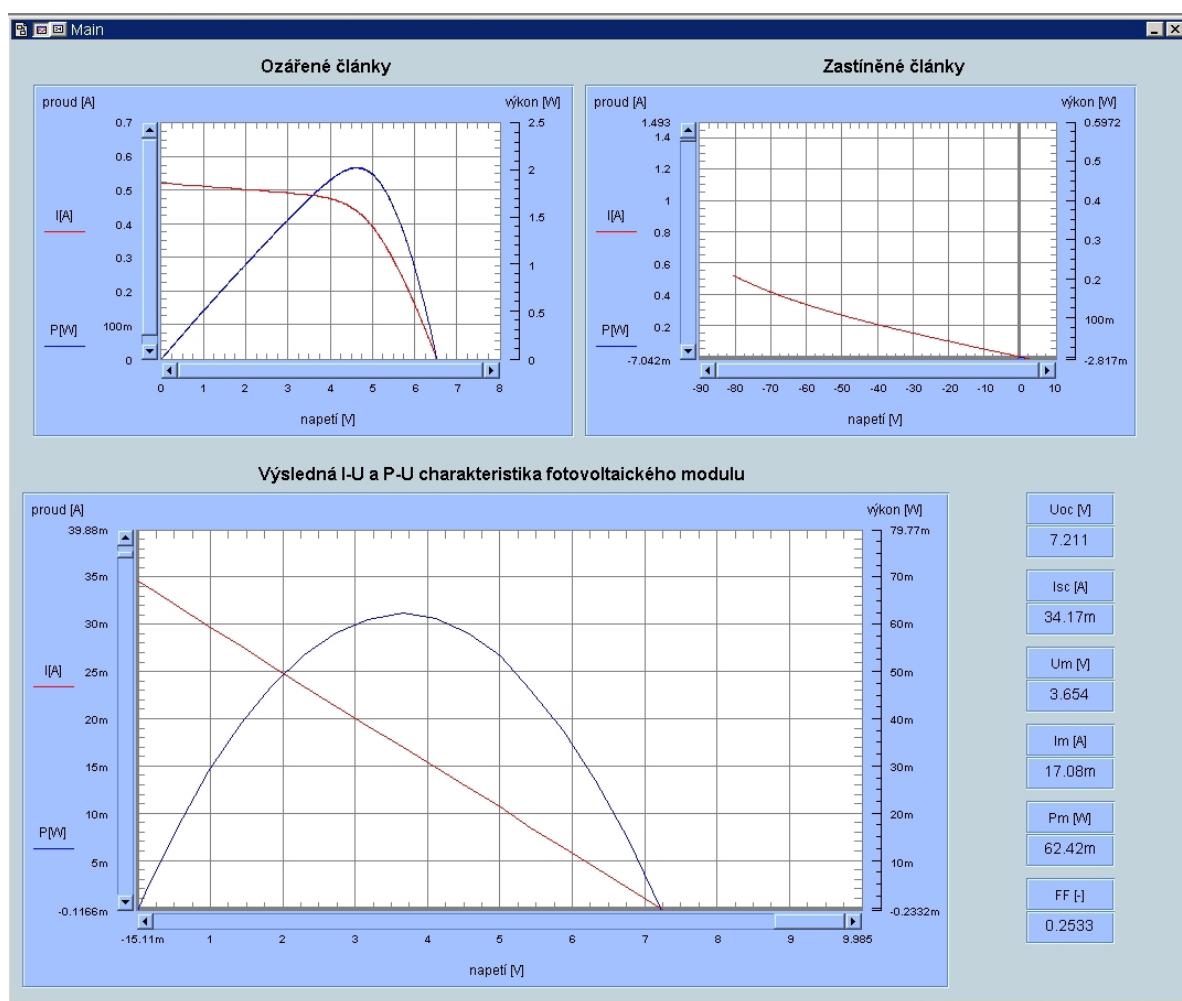


Obrázek 39: I-U charakteristika 6ti zastíněných solárních článků

Na obr. 39 je graf průběhu volt-ampérové charakteristiky šesti zastíněných solárních článků. Je vidět, že značná část I-U charakteristiky se nachází v kvadrantu, kde solární článek odebírá energii.

6.7 Simulace zastínění solárního panelu

Výsledná simulace zastínění solárního panelu probíhá ve dvou etapách. Nejprve je pomocí programu Solar6 (obr. 40) vytvořena I-U charakteristika řetězce s několika zastíněnými solárními články. V mém případě jsem provedl simulaci I-U charakteristik u řetězce 18ti solárních článků v němž 6 solárních článků bylo zastíněno. Nastavené parametry programů Solar300 a Solar400 jsou zaneseny do tabulky 9.



Obrázek 40: Solar6 I-U a I-P charakteristika řetězce 18ti solárních článků s 6ti zastíněnými solárními články

Program Solar6 provádí sčítání dat výstupních hodnot programů Solar300 a Solar400. Postup výpočtu probíhá tak, že pro každou hodnotu proudu se sčítá hodnota napětí nezastíněných solárních článků a hodnota napětí zastíněných solárních článků tzn. pro jedno y se sčítají dvě x -ové hodnoty.

	Solar300	Solar400	
Nastavené parametry	Velikost	Velikost	Jednotka
R_s	0,2	4	Ω
R_p	9	33	Ω
Plocha	10m	10m	m^2
Články v sérii	12	6	-
Diodový faktor m_1	1	1	-
Diodový faktor m_2	2	2	-
Intenzita světla	140	1	W/m^2
b	-	2,33m	S
V_{Br}	-	-18	V
C_1	4	4	m^2/V
C_2	-0,6u	-0,6u	m^2/VK
C_{s1}	30	30	A/K^3
C_{s2}	1m	1m	$A/K^{(5/2)}$
T	311	295,2	K

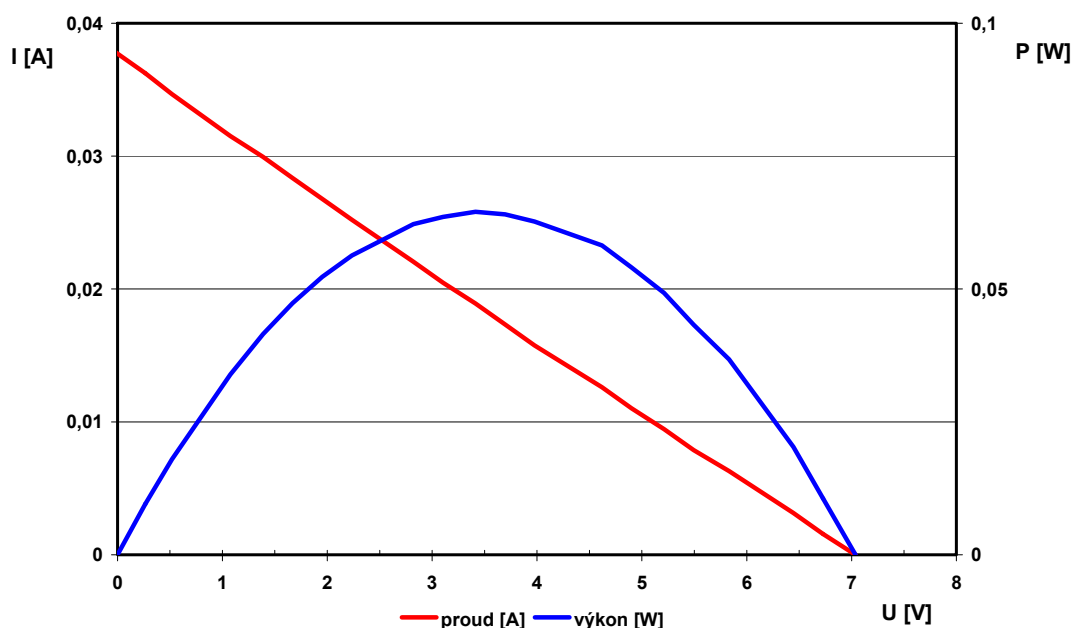
Tabulka 9: Nastavené parametry programů Solar300 a Solar400

Obr. 40 znázorňuje výstup programu Solar6 pro částečně zastíněný řetězec solárního panelu. V levé horní části aplikace je graf 12ti ozářených solárních článků. V pravé horní části je graf 6ti zastíněných solárních článků. Konečná I-U charakteristika částečně zastíněného řetězce solárních článků je vykreslena v dolní části. Výsledná data jsou vložena do programu MS Excel a z nich vytvořen graf obr. 41.

V tabulce 10 jsou zaneseny výstupní hodnoty zastíněného řetězce 18ti solárních článků s šesti zastíněnými solárními články. Porovnáním s nezastíněným řetězcem solárních článků je výstupní výkon přibližně 10x menší. Jeho hodnota se změnila z 0,6W na 0,06W.

Naměřené hodnoty	Velikost	Jednotka
U_{OC}	7,21	V
I_{SC}	34,17m	A
U_{MPP}	3,65	V
I_{MPP}	17,08m	A
P_{MPP}	62,42m	W
FF	0,25	-

Tabulka 10: Naměřené hodnoty řetězce s 12ti ozářenými a 6ti zastíněnými solárními články



Obrázek 41: I-U a P-U charakteristika částečně zastíněného řetězce solárních článků

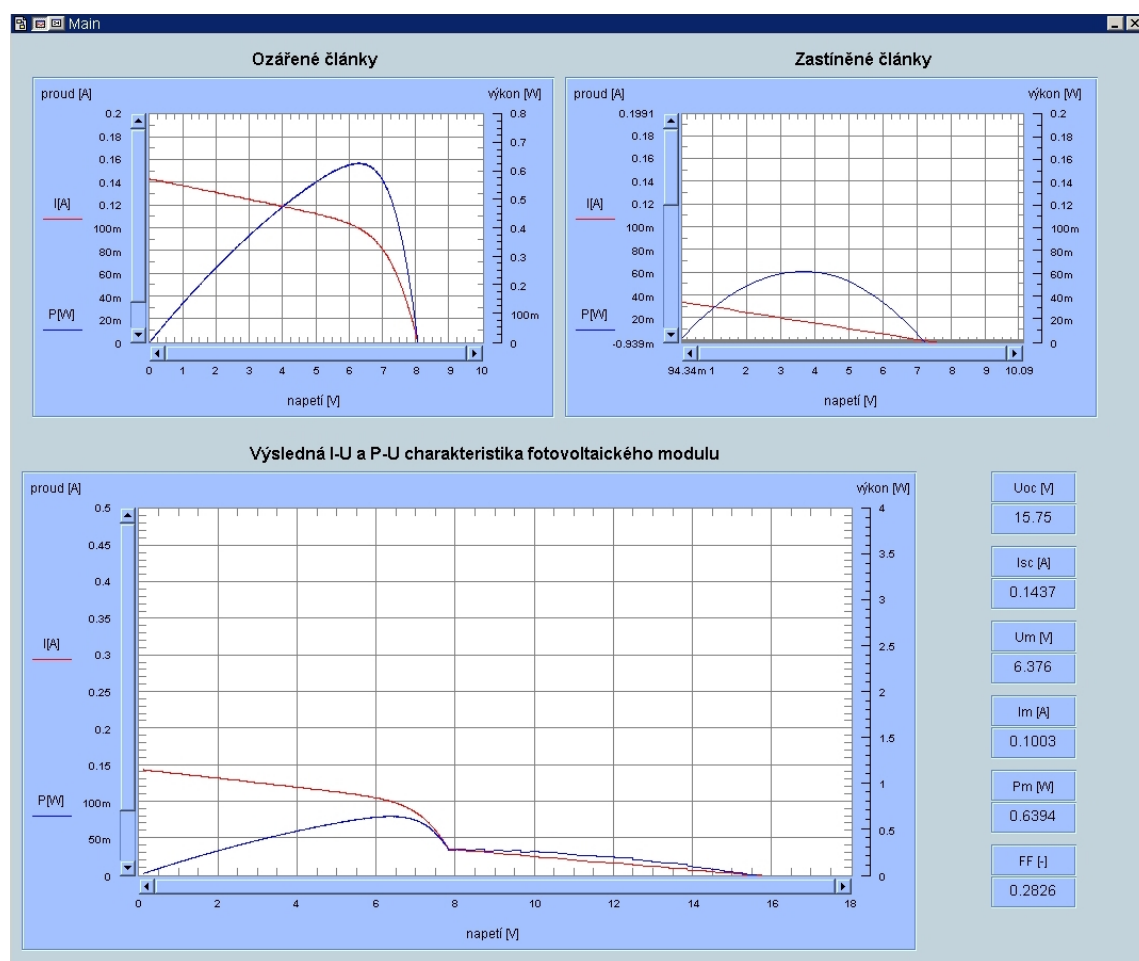
Výsledná I-U a P-U charakteristika fotovoltaického panelu s bypassovými diodami se provádí pomocí programu Solar7. Tento program sčítá výsledné hodnoty z programu solar300 a Solar6, tedy hodnoty nezastíněného řetězce 18ti solárních článků a řetězce 18ti solárních článků v němž je šest solárních článků zastíněno. Nastavené parametry programu Solar300 jsou zaneseny do tabulky 11.

Nastavené parametry	Velikost	Jednotka
R_S	300m	Ω
R_P	10	Ω
Plocha	10m	m^2
Články v sérii	18	-
Diodový faktor m_1	1	-
Diodový faktor m_2	2	-
Intenzita světla	140	W/m^2
C_1	1,23	m^2/V
C_2	-0,6u	m^2/VK
C_{S1}	430	A/K^3
C_{S2}	1m	$A/K^{(5/2)}$
T	304,6	K

Tabulka 11: Nastavené parametry programu Solar300

Na obr. 42 je výsledná I-U a P-U charakteristika zastíněného solárního panelu v programu Solar7. V levé horní části je I-U a U-P charakteristika nezastíněného řetězce 18ti solárních článků. V pravé horní části je vidět I-U a P-U charakteristika řetězce 18ti článků s 6ti zastíněnými solárními články.

Konečný průběh I-U a P-U charakteristik je vyneseno pomocí MS Excel do grafu (obr. 43).



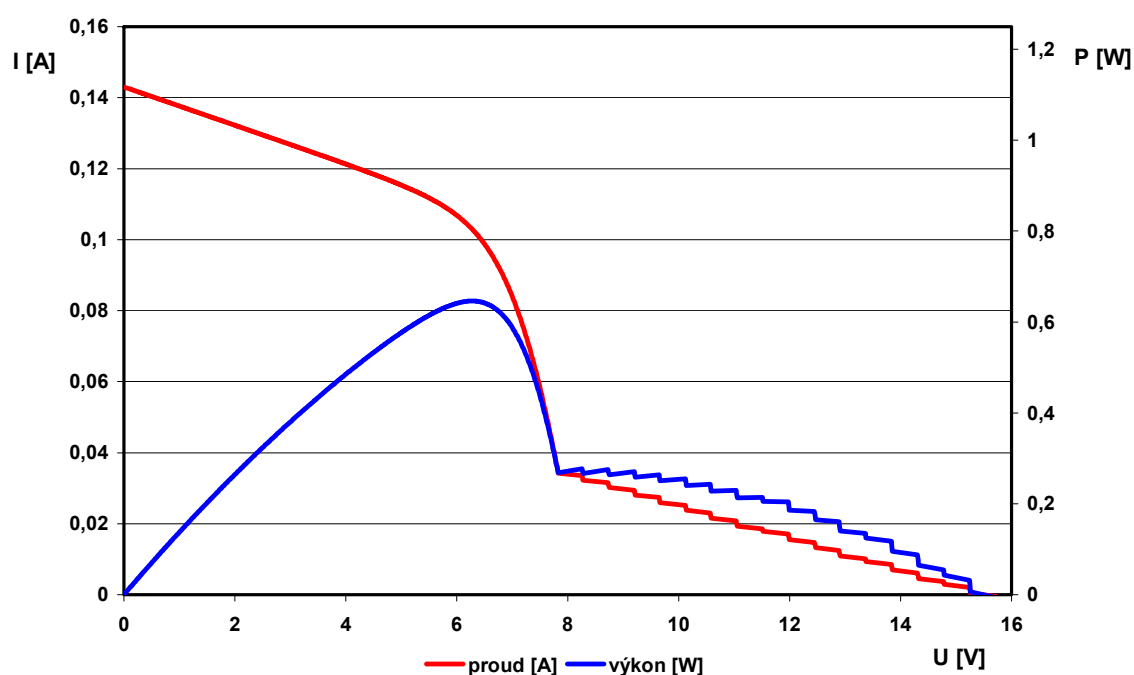
Obrázek 42: Solar7-výsledná I-U a P-U charakteristika zastíněného solárního panelu

Skokový průběh I-U charakteristiky, který je vidět v grafu na obr. 43 je způsoben menším objemem vypočtených dat. Zvýšením počtu intervalů a opakováním při výpočtu by se zvětšil objem dat a volt-ampérová charakteristika by měla hladší průběh. Z důvodu časové a výkonové náročnosti na výpočet bylo při simulaci nastaveno 100 intervalů s třemi opakováními.

Naměřené hodnoty	Velikost	Jednotka
U_{OC}	15,75	V
I_{SC}	0,142	A
U_{MPP}	6,38	V
I_{MPP}	0,10	A
P_{MPP}	0,64	W
FF	0,28	-

Tabulka 12: Hodnoty částečně zastíněného solárního panelu

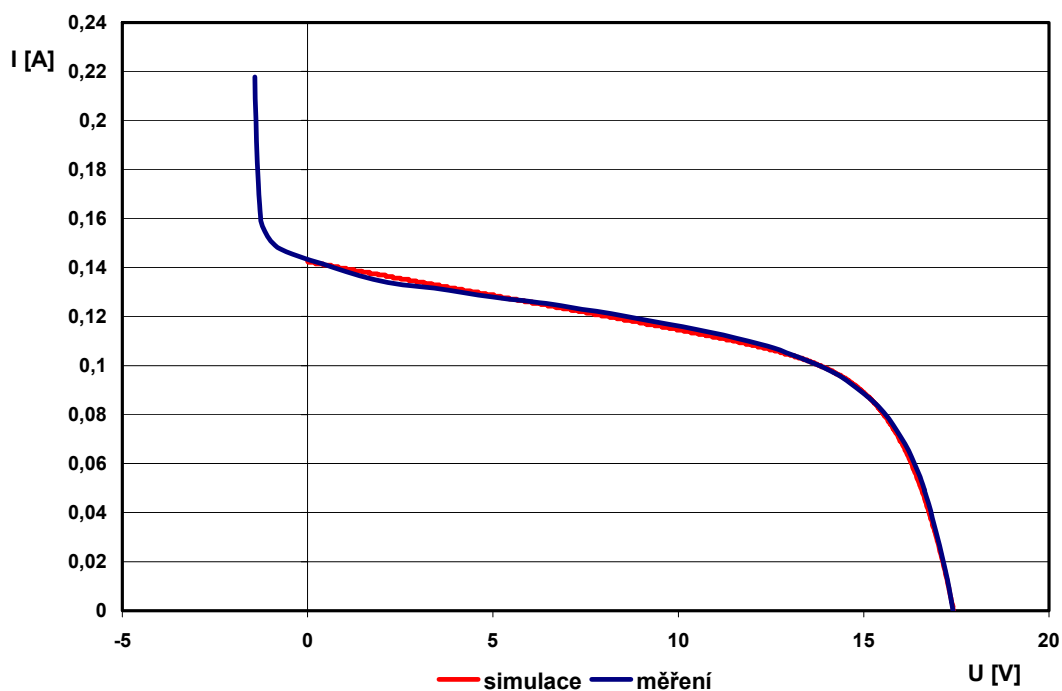
Volt-ampérová a výkonová charakteristika zastíněného panelu je vidět na obr. 43. Výkonová křivka má dvě maxima a panel při maximálním výkonu generuje proud 100mA a napětí 6,38V.



Obrázek 43: I-U a P-U charakteristika částečně zastíněného solárního panelu

6.8 Porovnání reálného měření a simulace

Na obr. 44 je porovnání reálného měření a simulace plně ozářeného solárního panelu bez zastínění. Vzhledem k velkému počtu neznámých parametrů bylo obtížné nasimulovat přesný průběh volt-ampérové charakteristiky měřeného solárního panelu. Systematické zadávání parametrů při simulaci bylo prováděno na základě předem zjištěných závislostí jednotlivých parametrů na volt-ampérovou charakteristiku.



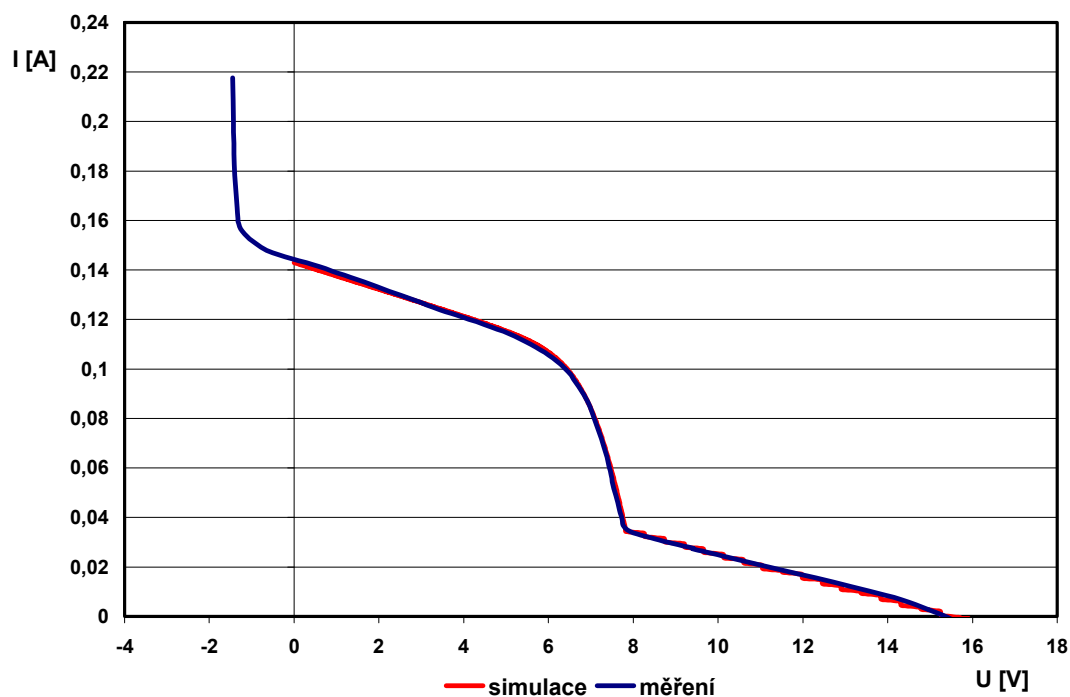
Obrázek 44: Porovnání I-U charakteristik měřeného solárního panelu a simulace

Při porovnání volt-ampérových charakteristik reálného měření a simulace vidíme, že převážně v části mezi I_{SC} a U_{MPP} dochází k odlišnostem. To může být způsobeno nehomogenním osvětlením solárního panelu při reálném měření volt-ampérových charakteristik.

	U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	U_{MPP} [W]	I_{MPP} [A]	P_{MPP} [W]
reálné měření	17,4	0,143	13,894	0,099	1,381
simulace	17,424	0,143	14,022	0,099	1,387

Tabulka 13: Porovnání hodnot simulace a reálného měření solárního panelu

Na obr. 45 jsou porovnány volt-ampérové charakteristiky zastíněného solárního panelu a simulace. V grafu je vidět značná shoda I-U charakteristiky reálného měření a simulace.



Obrázek 45: Porovnání I-U charakteristik reálného měření a simulace částečně zastíněného solárního panelu

Mírná odlišnost volt-ampérových charakteristik zastíněného solárního panelu a jeho simulace může být dána nehomogenním rozložením světelného záření, stářím solárního panelu a odlišnou intenzitou osvětlení zastíněných článků.

V tabulce 14 jsou vyneseny jednotlivé výsledné hodnoty simulace a reálného měření částečně zastíněného solárního panelu.

	U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	U_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	P_{MPP} [W]
reálné měření	15	0,143	6,456	0,099	0,639
simulace	15,75	0,14	6,38	0,1	0,64

Tabulka 14: Hodnoty částečně zastíněného solárního panelu reálného měření a simulace

7 Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval problematikou vlivu bypassových diod na volt-ampérovou charakteristiku solárního panelu.

K získání potřebných informací bylo nutné provést řadu reálných měření, která pak byla následně ověřena pomocí simulace I-U a P-U charakteristik fotovoltaiického panelu.

Cílem práce bylo pomocí těchto reálných měření popsat a ověřit vliv bypassových diod na zastíněný fotovoltaiický panel a získané I-U a P-U charakteristiky ověřit pomocí simulace.

Teoretická část práce popisuje důležitost obnovitelných zdrojů energie pro výrobu elektrické energie zejména pak elektrické energie ze solárních panelů. Dále se zaměřuje na popis principů fotovoltaiických panelů, jejich elektrických vlastností a parametrů.

Pro praktické měření vlivu zastínění reálného fotovoltaiického panelu bylo nutné sestavit automatické měřicí pracoviště. Pomocí propojení měřicího zařízení s počítačem a programu vytvořeném v softwaru Agilent bylo měření reálných volt-ampérových charakteristik rychlé a přesné. Velkou výhodou bylo také možnost okamžitého vyhodnocení naměřených dat a porovnání jednotlivých charakteristik při různých podmínkách měření.

Reálná měření probíhala na starším, universitou dodaném solárním panelu. Měření byla prováděna při osvitu zářivkou 500W a probíhala ve dvou částech. Pro solární panel s bypassovými diodami a pro solární panel bez bypassových diod. V každé části se měřila I-U charakteristika nezastíněného solárního panelu, řetězce s 18ti nezastíněnými solárními články, částečně zastíněného řetězce s 18ti solárními články a částečně zastíněného solárního panelu.

Při simulaci volt-ampérových charakteristik reálného solárního panelu bylo využito souboru programů vytvořených v prostředí Agilent VEE 8.0. V programech lze nastavit základní parametry solárního panelu jako sériový odpor, paralelní odpor, plocha článku, diodový faktor, počet sériově řazených článků, intenzitu světla, teplotu a charakteristické konstanty c_1 , c_2 , c_{S1} , c_{S2} . Výstupem simulace je I-U charakteristika a průběh výpočtu. Pomocí MS Excel byly následně vytvořeny grafy I-U a P-U charakteristik jednotlivých simulací.

Při simulaci byly v programu nastaveny nejprve známé parametry reálného fotovoltaiického panelu, který byl měřen v laboratoři. Těmito parametry byla teplota článků, intenzita světla, počet článků a plocha článků. Poté se hledaly takové hodnoty sériového

odporu, paralelního odporu a konstant c_1 , c_2 , c_{S1} , c_{S2} , aby byla totožná reálná a nasimulovaná volt-ampérová charakteristika.

V poslední části práce bylo porovnáváno reálné měření zastíněného solárního panelu a simulace v programu Agilent VEE 8.0. Určité odlišnosti průběhů I-U charakteristik simulace a reálného měření mohou být dány nehomogenním rozložením dopadajícího světelného záření na reálný solární panel, zahříváním a změnou teploty solárních článků během měření a vlivem jedinečnosti každého solárního článku v panelu.

Porovnáním P-U charakteristik reálného měření zastíněného fotovoltaického panelu s bypassovými diodami a zastíněného fotovoltaického panelu bez bypassových diod bylo zjištěno, že pro fotovoltaický panel bez bypassových diod poklesl výkon o 47,5%. Z tohoto důvodu jsou bypassové diody již standardně součástí fotovoltaických panelů.

8 Použitá literatura

- [1] John Schaeffer, Solar Living Source Book, 2007, Gaia: 634 stran.
- [2] Karel Murtinger, J., Beranovský, M., Tomeš, Fotovoltaika. 2007, Brno: Kopp 81 stran. ISBN 9788073661007
- [3] Quaschnig, Volker, Understanding renewable energy systems. 2005, UK
- [4] ČEZ, Obnovitelné zdroje energie, 2007, Praha: 188 stran.
- [5] Solar Energy, Dostupné z www: <http://www.scribd.com/doc/47488618/6068771-Solar-Energy>
- [6] Fotovoltaika, Dostupné z www: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>
- [7] A. W. Bett, Multi-junction Solar Cells in Europe, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany
- [8] Solar radiation, Dostupné z www: http://elad.lbl.gov/index.php/Solar_Radiation
- [9] Sluneční záření dopadající na zemský povrch, Dostupné z www: <http://education.gsfc.nasa.gov/experimental/all98invproject.site/pages/trl/inv2-1.abstract.html>
- [10] Mikl, A. Vyhodnocení ekonomické efektivnosti solárního systému. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Macháček
- [11] Gajdošík, I. Technické řešení fotovoltaické elektrárny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ivan Míča.
- [12] Křivík, P. Metody simulace I-U a P-U charakteristik fotovoltaického panelu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [13] Libra, Martin; Poulek, Vladislav. Solární energie: fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti. 1. vyd. V Praze: ČZU, 2005. 122 s. ISBN 8021381335

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1:	Přeměna sluneční energie při průchodu atmosférou [9].....	10
Obrázek 2:	Dopadající sluneční záření a)Přímé, b)Difuzní, c)Odražené [8].....	10
Obrázek 3:	Spektrum slunečního záření dopadající na zemský povrch a v kosmickém prostoru [3].....	11
Obrázek 4:	Dotování křemíku fosforem, borem a vznik volného elektronu a díry [3].....	12
Obrázek 5:	P-N přechod [3].....	14
Obrázek 6:	Ozářený P-N přechod solárního článku [3].....	15
Obrázek 7:	Vnitřní složení solárního článku [3].....	16
Obrázek 8:	Více přechodové struktury, jejich složení a účinnost [7].....	18
Obrázek 9:	I-U a P-U charakteristika solárního článku	19
Obrázek 10:	Závislost I-U charakteristiky solárního článku na teplotě [3].....	21
Obrázek 11:	Vliv intenzity slunečního záření na výkon solárního panelu [5].....	22
Obrázek 12:	Vliv sériového odporu na I-U charakteristiku solárního článku [3].....	23
Obrázek 13:	Vliv paralelního odporu na I-U charakteristiku solárního článku [3].....	24
Obrázek 14:	Sériové propojení solárních článků [3].....	24
Obrázek 15:	I-U charakteristika pro různý počet sériově propojených solárních článků [3].....	25
Obrázek 16:	I-U charakteristika solárního článku pro různou intenzitu záření [3].....	26
Obrázek 17:	I-U charakteristika solárního panelu s částečně zastíněným článkem [3].....	28
Obrázek 18:	Způsob zapojení bypassové diody v solárním panelu [3].....	29
Obrázek 19:	I-U charakteristika solárního panelu s bypassovými diodami přes různý počet článků ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [3].....	30
Obrázek 20:	P-U charakteristika solárního panelu s různým stupněm zastínění jednoho solárního článku ($E = 574 \text{ W/m}^2$, $T = 300 \text{ K}$) [3].....	30
Obrázek 21:	Jednoduchý ekvivalentní obvod [3].....	31
Obrázek 22:	Vliv intenzity záření E na I-U charakteristiku solárního článku [3].....	32
Obrázek 23:	Dvou-diodový model solárního článku [3].....	34

Obrázek 24:	Dvou-diodový model s rozšířeným členem [3].....	35
Obrázek 25:	Měřicí pracoviště	38
Obrázek 26:	Schéma zapojení měřicího pracoviště	39
Obrázek 27:	Fotovoltaický panel.....	40
Obrázek 28:	I-U a P-U charakteristika nezastíněného solárního panelu	41
Obrázek 29:	I-U a P-U charakteristika 18ti solárních článků	42
Obrázek 30:	I-U charakteristika zastíněného řetězce 18ti solárních článků	43
Obrázek 31:	I-U a P-U charakteristika zastíněného solárního panelu s bypassovými diodami	44
Obrázek 32:	Porovnání I-U charakteristik solárního panelu a řetězce 18ti článků s bypassovými diodami a bez nich.....	45
Obrázek 33:	Porovnání I-U a P-U charakteristik zastíněného solárního panelu s bypassovými diodami a bez nich.....	46
Obrázek 34:	Grafické prostředí programu	47
Obrázek 35:	Solar300-Simulace I-U a U-P charakteristiky nezastíněného solárního panelu.....	51
Obrázek 36:	I-U a P-U charakteristiky nezastíněného solárního panelu	53
Obrázek 37:	I-U a P-U charakteristiky nezastíněného řetězce 18ti solárních článků	53
Obrázek 38:	Solar400-Simulace I-U a I-P charakteristik zastíněných solárních článků.....	54
Obrázek 39:	I-U charakteristika 6ti zastíněných solárních článků	55
Obrázek 40:	Solar6 I-U a I-P charakteristika řetězce 18ti solárních článků s 6ti zastíněnými solárními články.....	56
Obrázek 41:	I-U a P-U charakteristika částečně zastíněného řetězce solárních článků.....	58
Obrázek 42:	Solar7-výsledná I-U a P-U charakteristika zastíněného solárního panelu	59
Obrázek 43:	I-U a P-U charakteristika částečně zastíněného solárního panelu	60
Obrázek 44:	Porovnání I-U charakteristik měřeného solárního panelu a simulace	61
Obrázek 45:	Porovnání I-U charakteristik reálného měření a simulace částečně zastíněného solárního panelu	62

10 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1:	Použitá zařízení	37
Tabulka 2:	Hodnoty nezastíněného solárního panelu.....	41
Tabulka 3:	Hodnoty nezastíněného řetězce 18ti solárních článků	42
Tabulka 4:	Hodnoty zastíněného solárního panelu	43
Tabulka 5:	Naměřené hodnoty solárního panelu	45
Tabulka 6:	Nastavené parametry programu Solar300.....	52
Tabulka 7:	Výstupní hodnoty simulace 36ti a 18ti solárních článků	52
Tabulka 8:	Naměřené hodnoty šesti zastíněných solárních článků	55
Tabulka 9:	Nastavené parametry programů Solar300 a Solar400.....	57
Tabulka 10:	Naměřené hodnoty řetězce s 12ti ozářenými a 6ti zastíněnými solárními články	57
Tabulka 11:	Nastavené parametry programu Solar300.....	58
Tabulka 12:	Hodnoty částečně zastíněného solárního panelu	60
Tabulka 13:	Porovnání hodnot simulace a reálného měření solárního panelu	61
Tabulka 14:	Hodnoty částečně zastíněného solárního panelu reálného měření a simulace	62